



**Universidade de Aveiro** Departamento de Engenharia Civil  
**2017**

**João Filipe  
Silva Freitas**

**Adaptação de grouts de injeção para ações de reabilitação de  
revestimentos**





**João Filipe  
Silva Freitas**

**Adaptação de grouts de injeção para ações de reabilitação de revestimentos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Professora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, Professora associada com agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e coorientação científica do Doutor Luís Filipe Mariz de Matos Ferreira, investigador da UID/GEO/04035 e investigador da empresa DDL Argamassas, Lda.





## **o júri**

Presidente

**Professora Doutora Maria Fernanda da Silva Rodrigues**

Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

**Professor Doutor João António Labrincha Baptista**

Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

**Professora Doutora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa**

Professora Associada com Agregação da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Após o término deste trabalho, quero desde já agradecer às variadas pessoas que se cruzaram na minha vida, tanto a nível pessoal como a nível de descoberta científica, tendo me acompanhando durante este caminho, que muitas vezes foi árduo.

No entanto, não posso deixar de agradecer mais concretamente certas pessoas:

À minha orientadora, Professora Ana Luísa Pinheiro Lomelino Velosa, por toda a disponibilidade demonstrada em todas as etapas deste trabalho, por toda a transmissão de conhecimentos que me foi disponibilizando, por toda a paciência e por todos os esforços que fez para que tornasse esta etapa possível, desde a parte laboratorial, até à parte do conhecimento científico.

Ao meu coorientador Doutor Luís Filipe Mariz de Matos Ferreira, pela passagem do conhecimento científico, pela disponibilidade e ajuda em todas as etapas laboratoriais, pelos conselhos e sugestões que me foi dando. Também agradecer não só pela parte laboratorial, mas por toda a disponibilidade demonstrada para ajudar a finalizar a tese de dissertação.

À Engenheira Maria Carlos e ao Técnico Vítor Rodrigues, por todo o auxílio disponibilizado durante a fase experimental, por todo o conhecimento transmitido, também pelas muitas vezes conversas, tanto pessoais como “profissionais”, acabando por se tornar uma relação de amizade/trabalho.

Aos meus pais, Maria e Joaquim, bem como a minha irmã, Carla, por todo o amor, compreensão, amizade, apoio e, sobretudo, por estarem sempre do meu lado quando muitas vezes a vontade era desistir. Por tudo o que fizeram e demonstraram por mim, dedico este trabalho a vocês e espero que tenham sempre orgulho em mim.

À minha namorada Rita, por sempre estar do meu lado, por sempre me incentivar e demonstrar orgulho em mim, pela amizade e carinho, por toda a paciência demonstrada.

Aos meus amigos em geral, por sempre se preocuparem comigo e estarem lá para mim quando mais precisei, durante estes anos de trabalho.

Ao Hugo Meneses, por toda a ajuda laboratorial que disponibilizou, pela passagem de conhecimento, pelos conselhos e por todos os bons momentos passados. Quando se está a realizar ensaios laboratoriais, as coisas nem sempre correm bem e tu foste uma grande ajuda e sempre me fizeste ter força para continuar.

Aos amigos mais chegados, não querendo me esquecer de ninguém, vocês sabem quem são, quero agradecer por tudo mesmo. Pelos bons momentos passados, pelas conversas, tanto desabaços como risadas, pela companhia de trabalho, pela ajuda na finalização da tese.

**palavras-chave**

Reabilitação de revestimentos, grouts de injeção, cal aérea, agregados, compatibilização dos materiais

**resumo**

Hoje em dia sabe-se que o setor da construção civil passa por uma fase de mudança, isto é, a construção de edificado novo não tem um papel tão importante como tinha há alguns anos atrás. Hoje em dia, é dada uma maior importância às obras de conservação e reabilitação, visto existir um número muito elevado de edifícios antigos.

Assim, como o objetivo é reabilitar e conservar o edificado antigo, é necessário ter em conta que estes possuem características e materiais diferentes do que é atualmente construído. Sendo necessário compatibilizar as características que está diretamente ligada à compatibilização dos materiais, idealizou-se a possibilidade de realização de grouts de injeção de cal aérea. Contudo, não basta realizar um grout de injeção de cal aérea e aplicar, existem pré-requisitos a cumprir que acabam por ser difíceis de obter devido não só às condições existentes como também aos revestimentos em si, encontrados em obra. Este é um tema ainda em fase de desenvolvimento, pois ainda não existe um consenso quanto à viabilidade de aplicação de grouts de cal aérea em reabilitação, relativamente à sua durabilidade, resistência mecânica, tempo de presa, entre outros fatores.

Este trabalho visou o estudo de grouts de injeção de cal aérea com diferentes características que conseguissem responder aos problemas de destacamento e/ou fissuração dos revestimentos, podendo eles ser aplicados em fachadas azulejares, pinturas murais, barramentos e rebocos.

Foram desenvolvidas duas formulações de grouts de injeção de cal aérea e testadas outras duas já existentes e, no total, estudaram-se 26 formulações do mesmo tipo. Com estas argamassas pretendeu-se obter uma caracterização física e mecânica, tanto para estado fresco como para estado endurecido, de forma a realizar comparações entre si, para se concluir qual o melhor ou melhorias nas suas características. A falta de valores, relativamente ao suporte, foi um entrave, mas de forma geral, pode-se dizer que estes grouts de injeção de cal aérea possuem um desempenho razoável, com potencialidades de aplicação.



**keywords**

Rehabilitation of coatings, injection grouts, air lime, aggregates, compatibility of materials

**abstract**

Nowadays it is known that the Civil Engineering sector goes through a phase of change, that is, the construction of new buildings doesn't have an important role as it had a few years ago. At present, greater importance is given to conservation and rehabilitation works, since there are many old buildings.

Thus, since the work is to rehabilitate and preserve the old buildings, it is necessary to know that these have different characteristics and materials than what is currently built. To answer the question of compatibilization of the characteristics that is directly related to the compatibilization of materials, it was conceived the accomplishment of grouts of injection of aerial lime. However, it is not enough to carry out a grout of injection of aerial lime and everything is fulfilled, there are prerequisites to achieve that turn out to be very difficult due to the existing conditions both in work and the coatings themselves. This is a topic still under development, as there is still no consensus regarding the feasibility of aerial lime grouts for durability, mechanical strength, prey time, among other factors.

This work aimed at the study of grouts of injection of aerial lime that could respond to the problems of detachment and / or cracking of the coatings, which could be tile facades, wall paintings, buses, knockouts and renderings.

For this, 2 formulations of aerial lime injection grouts were developed and another 2 were already tested, and in total, 26 formulations of the same type were studied. With these limes, it was intended to remove the physical and mechanical characterization for both hardened and fresh state, in order to make comparisons between them, in order to conclude the best or improvements in their characteristics. This work showed that the results were quite satisfactory, but probably the addition of other elements, such as pozzolan or ashes, would make the results better. The lack of values, relative to the support, was a hindrance, but in general, it can be said that these air lime injection grouts have a good performance.





# Índice

Índice .....	I
Índice de Figuras.....	III
Índice de Tabelas .....	V
1. Introdução .....	1
1.1 Enquadramento teórico .....	1
1.2 Objetivos .....	5
1.3 Estrutura da dissertação .....	5
2. Grouts de injeção – Influência da cal e o seu contributo na compatibilização de materiais do edificado antigo 7	
2.1 Considerações gerais.....	7
2.2 Definição de grout.....	7
2.3 Objetivo da utilização dos grouts em alvenaria antiga .....	8
2.3.1 Exigências funcionais .....	8
2.3.2 Materiais .....	12
2.4 Técnicas de injeção de grouts .....	19
2.5 Propriedades de trabalho e características de desempenho dos grouts .....	21
2.6 Métodos de ensaio.....	22
2.6.1 Testes laboratoriais qualificados para grouts de injeção .....	22
2.6.2 Preparação dos grouts de injeção.....	23
2.7 Ensaios experimentais a realizar, concebidos pelo RILEM.....	24
2.7.1 Expansão e Exsudação.....	24
2.7.2 Retração .....	27
2.7.3 Ensaio do teste do cone de fluidez.....	28
2.7.4 Injetabilidade .....	29
2.8 Ensaios experimentais no estado endurecido.....	31
2.8.1 Execução dos provetes.....	31
2.8.2 Ensaio de aderência (Pull-off) .....	32
2.8.3 Módulo de elasticidade (Pundit).....	34

2.8.4	Resistência à tração ( $R_t$ ) .....	35
2.8.5	Resistência à compressão ( $R_c$ ) .....	36
2.8.6	Carbonatação .....	36
2.8.7	Determinação da absorção de água por capilaridade.....	37
3.	Apresentação e discussão de resultados .....	41
3.1	Considerações gerais.....	41
3.2	Formulações .....	41
3.2.1	Nomenclaturas dadas .....	45
3.2	Resultados dos grouts em estado fresco.....	45
3.2.1	Expansão e exsudação .....	45
3.2.2	Retração .....	47
3.2.3	Teste do cone de fluidez .....	48
3.2.4	Injetabilidade .....	48
3.3	Resultados dos grouts em estado endurecido.....	49
3.3.1	Ensaio Módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ) .....	49
3.3.2	Resistência à tração por flexão ( $R_t$ ).....	52
3.3.3	Resistência à compressão ( $R_c$ ) .....	53
3.3.4	Área não carbonatada .....	54
3.3.5	Absorção de água por capilaridade.....	56
3.3.6	Aderência ao suporte .....	62
4.	Conclusões .....	65
4.1	Conclusões .....	65
4.2	Desenvolvimentos futuros.....	66
	Referências bibliográficas .....	69

## Índice de Figuras

Figura 1 - Apresentação do ciclo da cal (Fioratti, 2012).....	2
Figura 2 – Caiação no claustro superior do Convento de Santo António (Caiar-te, n.d.) .....	5
Figura 3 - Esquema da relação entre exigências funcionais dos grouts, 1, 3, 4 e 5.....	11
Figura 4 - Imagem representativa de uma porção de cal aérea (Sodimate, n.d.).....	13
Figura 5 - Areia de sílica (Risalex, n.d.).....	15
Figura 6 - Walocel, agente retentor de água usado neste trabalho (Dow Construction Chemicals, n.d.).....	17
Figura 7 - Injeção do grout sob pressão em obra (Indiamart, n.d.) .....	20
Figura 8 - Misturadora e moldes dos grouts preparados (Biçer- Şimşir & Rainer, 2013) ..	23
Figura 9 – Ensaio de expansão e exsudação.....	26
Figura 10 - Imagens do ensaio de retração a grouts de injeção de cal aérea .....	28
Figura 11 - Ensaio do cone de fluidez para os grouts de injeção .....	29
Figura 12 – Ensaio de injetabilidade, neste caso por gravidade.....	31
Figura 13 - Exemplo dos tipos de rotura existente, sendo que a mista é uma mistura dos dois tipos de rotura apresentados (Ferreira, 2012) .....	33
Figura 14 - Colocação das pastilhas metálicas, 48h antes e posterior ensaio de aderência.	34
Figura 15 - Dois exemplos de carbonatação, o primeiro apresenta valores de carbonatação muito menores, enquanto o segundo está aproximadamente metade carbonatado, sendo que cada um representa uma formulação diferente .....	37
Figura 16 - Imagem exemplificativa dos ensaios de absorção de água por capilaridade....	38
Figura 17- Gráfico para análise do tempo total de injeção vs quantidade injetada para cada grout.....	49
Figura 18 - Média dos módulos de elasticidade dos provetes dos grouts de injeção, após cura de 28 dias.....	51
Figura 19 - Média dos valores de resistência à tração por flexão de cada formulação .....	52
Figura 20 - Média dos valores de resistência à compressão de cada formulação .....	54
Figura 21 – Média dos valores da % de área não carbonatada de cada grout .....	55
Figura 22 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra DDL 3.1 .....	56
Figura 23 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra DDL 3.2 .....	57
Figura 24 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra DDL 3.3 .....	57
Figura 25 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra L.1 .....	57
Figura 26 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra L.2 .....	58

Figura 27 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra L.3 .....	58
Figura 28 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 11.1 G.....	58
Figura 29 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 11.2 G.....	59
Figura 30 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 11.3 G.....	59
Figura 31 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 12.1 G.....	60
Figura 32 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 12.2 G.....	60
Figura 33 - Coeficiente de capilaridade de cada formulação .....	61
Figura 34 - Média dos valores de tensão de aderência máxima de cada formulação.....	63
Figura 35 - Tipos de rotura observados nos provetes: 1ª- Rotura coesiva no suporte e adesiva DDL 3.1; 2ª- Rotura coesiva no suporte e mista DDL 3.2; 3ª- Rotura coesiva no suporte e mista DDL 3.3 .....	63
Figura 36 - Tipos de rotura observados nos provetes: 1ª- Rotura coesiva no suporte CL11.1 G; 2ª- Rotura coesiva no suporte CL11.2 G; 3ª- Rotura coesiva no suporte CL11.3 G.....	63
Figura 37 - Tipos de rotura observados nos provetes: 1ª- Rotura coesiva no suporte CL12.1 G; 2ª- Rotura coesiva no suporte CL12.2 G; 3ª- Rotura coesiva no suporte e adesiva CL12.3 G .....	64

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Exigências funcionais necessárias para um grout de injeção .....	8
Tabela 2 - Quadro representativo dos principais requisitos que os grouts devem ter segundo .....	12
Tabela 3 - Apresentação de vantagens e desvantagens dos grouts de cal aérea.....	14
Tabela 4 - Esquema dos ensaios a serem realizados para caracterização dos grouts de injeção .....	24
Tabela 5 - Diferentes formulações de grouts DDL.....	42
Tabela 6 - Diferentes formulações de grouts de cal aérea, para traço 1:1 e traço 1:2 .....	43
Tabela 7 - Diferentes formulações de grouts com substituição parcial da cal aérea por cal hidráulica, para um traço de 1:1:2 .....	44
Tabela 8 - Formulação do grout de cal aérea, para um traço 1:3 .....	44
Tabela 9 - Formulação do grout LEDAN TB1 .....	44
Tabela 10 - Nomenclaturas dadas para cada formulação .....	45
Tabela 11 - Valores de expansão e exsudação referente às formulações DDL 3, DDL 1, CL 13, CL + NHL 112 A, CL 11 A, CL 12 A, CL 11 G, CL 12 G.....	46
Tabela 12 - Valor do tempo de fluidez para os grouts L, DDL 3, CL 11 G e CL 12 G .....	48
Tabela 13 - Ensaios de injetabilidade realizados para as respectivas formulações.....	<b>Erro!</b>
<b>Marcador não definido.</b>	
Tabela 14- Valores do módulo de elasticidade dinâmico, Ed, de cada provete realizado...	50
Tabela 15 - Valores da resistência à tração por flexão de cada provete.....	52
Tabela 16 - Valores da resistência à compressão de cada provete .....	53
Tabela 17 - Valores da área não carbonatada de cada provete prismático e média para cada formulação .....	55
Tabela 18 - Valores do coeficiente de capilaridade para cada provete bem como as médias de cada formulação.....	61
Tabela 19 - Valores da tensão máxima de aderência e seus valores médios para cada formulação .....	62



# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento teórico

Nos dias de hoje sabe-se que grande parte do edificado de Portugal é antigo e encontra-se num estado de degradação tão elevado que a sua reabilitação tem um papel de extrema importância no panorama nacional. Dessa forma, pode-se verificar que atualmente a requalificação do edificado antigo tem maior impacto que a construção nova, daí haver um estudo cada vez mais detalhado de técnicas bem como de materiais a utilizar para esse efeito, tendo como finalidade existir uma compatibilização entre materiais originais e materiais novos.

A requalificação deste tipo de edificado é cada vez mais um tema exigente, tanto na parte teórica como experimental. O primeiro ligante a ser utilizado de forma corrente foi a cal, há muitos anos atrás, na era Antes de Cristo, não se sabendo ao certo como esta foi descoberta, mas pensa-se que possa ter sido através da realização de uma fogueira, que tinha pedra calcária a protegê-la, que reagindo com o fogo tenha dado origem à pedra calcinada. Deduz-se que posteriormente tenha existido precipitação de chuva e a cal tenha arrefecido e se tenha tornado um composto de hidróxido de cálcio, que por sua vez, reagiu com a areia que se encontravam ao seu redor e tenha dado origem à primeira argamassa. Através de leitura sobre a possível história da cal, pensa-se que os antigos já utilizavam a cal para diversas finalidades, tais como fundações de cal, fertilização de campos, estabilização dos solos e manter a coesão das pedras da Grande Muralha e, também possivelmente para a criação de uma das grandes maravilhas do Mundo, a pirâmide de Quéops, entre outras. Assim, pode-se verificar que o uso da cal não é exclusivo dos dias de hoje. (Lhoist, n.d.)

De seguida, através da figura 1, apresenta-se o ciclo da cal para uma melhor compreensão.

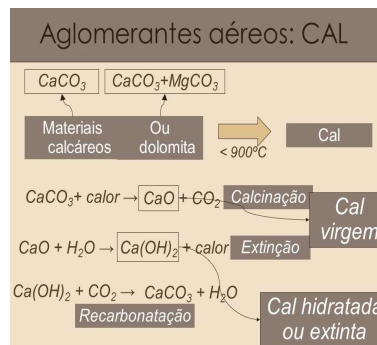


Figura 1 - Apresentação do ciclo da cal (Fioratti, 2012)

No entanto, quando se substituiu o tipo de ligante de cal para o cimento tipo Portland, no início do séc. XIX, a utilização da cal perdeu importância e, com isto, as técnicas que até então tinham sido aperfeiçoadas através dos anos, foram-se perdendo e aprimorando-se as do cimento, até praticamente se ter deixado de usar a cal como material de construção. Contudo, com o passar dos anos e da experiência adquirida, a necessidade de conservar o edificado em vez de implementar novo, trouxe novos desenvolvimentos importantes na requalificação dos edifícios. O cimento, após utilização desmedida, sem qualquer tipo de critério, apresentou uma série de fracassos. Assim, com alguma naturalidade, voltou-se a estudar novas formas de se processar à conservação e reabilitação, surgindo assim de novo o interesse do uso da cal.

Com a corrente utilização, verificou-se que a cal tem, nos dias de hoje, grande importância, tais como na construção, ingrediente para pasta dos dentes, substituição de incrustações de marfim para realização de esculturas e outros elementos arquitetónicos, entre muitas outras situações. (Lhoist, n.d.)

Aliás, o ato de aplicação de grouts para colagem ou consolidação de revestimentos de paredes não é novo. De facto, não há falta de registos, havendo documentos de projetos de aplicações de grouts ao longo do ano 1800 e mesmo antes, sendo esta data a considerada como provavelmente a data da técnica mais antiga de aplicação de grouts (Pellegrino, G., 1999).

Entre 1980 e 1984, uma equipa de instigadores liderada pelo professor Giorgio Torraca, (Rainer & Beril Biçer-Şimşir, 2013), no centro internacional para o estudo da preservação e restauração de bens culturais (ICCROM), realizaram testes de caldas de injeção para superfícies arquitetónicas, tal como rebocos, mosaicos e pinturas murais. Isto permitiu que se desenvolvessem ensaios e formulações de grouts. No entanto, as caldas até então comercializadas eram pouco conhecidas. Mais tarde, de forma a dar aos conservadores



melhores opções de escolha e mais informação, o Getty Conservation Institute (GCI), realizou um projeto tendo como finalidade a obtenção de resultados para todas as caldas de injeção comercializadas. Após uma revisão da literatura e investigação relativa ao campo das caldas de injeção, esta equipa concluiu que havia pouca consistência em procedimentos de teste e ainda não tinham sido desenvolvidos normas relativamente aos métodos de ensaio.

Embora caldas de injeção com formulações distintas compartilhem algumas propriedades, quando estas se relacionam com diferentes materiais, apresentam parâmetros pouco ou nada similares. Assim, conclui-se que não há qualquer hipótese de comparação entre resultados de testes, se estes forem realizados por empresas ou conservadores diferentes. De forma a evitar resultados que não fossem passíveis de comparação, o GCI desenvolveu um conjunto de procedimentos de laboratório e testes de campo que fossem semelhantes.

Testes de campo são, normalmente, baseados em testes laboratoriais, embora sejam utilizados procedimentos e equipamentos mais básicos, pois estes são mais disponíveis aos conservadores de campo. Se se juntar testes realizados in situ e testes laboratoriais, obter-se-á resultados mais vastos e completos relativos às propriedades do grout e ao seu desempenho, comparando-se posteriormente as diferentes formulações dos grouts e verificando-se as propriedades para aplicações específicas e condições de campo.

A aderência é um dos aspetos fundamentais quando se fala de anomalias de revestimentos exteriores, sendo o caso de estudo em questão de reabilitação de revestimentos, pois esta é a degradação usual e a que tem um impacto maior. Este tipo de degradação deve-se em grande parte ao “envelhecimento” dos materiais, normalmente da cal e da areia, e à interface entre camadas (argamassa/azulejo, por exemplo). (Botas, Veiga, & Velosa, 2012)

Pode-se concluir que no mecanismo de aderência, a parte do sistema com uma importância maior é a interface argamassa/azulejo, porque é onde ocorre a penetração de água e matéria fina da argamassa no azulejo e a carbonatação do ligante que promove a ligação dos dois corpos. Outro aspeto a ter em conta nesta área é uma probabilidade de existência de concentração de humidades ou de sais solúveis, agentes que podem ser igualmente responsáveis pelo descolamento dos revestimentos. (Botas et al., 2012)

Os problemas de aderência mais comuns neste tipo de situação são o descolamento, o destacamento e o aparecimento de lacunas no revestimento (Tavares, 2009).

Outro aspeto bastante relevante são as questões de índole económica e assim o uso da cal sobrepõe-se ao do cimento, visto os seus custos serem bastante inferiores.

Como referido anteriormente, a reabilitação de revestimentos é muito mais do que reabilitar fachadas azulejares antigas, quando se trata de revestimentos pode-se falar também de pinturas murais, barramentos, caiações e rebocos.

Em Portugal existe um património histórico vasto e, ao contrário do que se pensava, nem só nas igrejas se encontram pinturas murais, pois com as consecutivas obras de reabilitação de revestimentos foi-se descobrindo que o nosso país é rico em pinturas, logo estas fazem parte da história do nosso edificado, sendo assim a sua preservação um objetivo a atingir. Estas têm sido expressões da criação humana através da história, desde a arte rupestre até aos murais atuais. Sendo este um património do ponto de vista cultural de um valor incalculável, tanto a nível nacional como a nível mundial, então a sua degradação, tanto accidental ou por destruição, causaria um impacto cultural excessivamente negativo, de acordo com o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios. (Icomos, 2003)

Existem dois diferentes tipos de pinturas murais, pinturas a fresco e a têmpera.

As pinturas a fresco são obras de pinturas murais realizadas sobre uma parede, que tem como base gesso ou cal humedecida. Esta pintura normalmente é realizada com o uso de pigmentos puros, isto é, pigmentos inorgânicos, numa suspensão aquosa e, não havendo algo que os ligue ao suporte onde estes são aplicados, então a cal que faz parte do reboco irá ser o elemento fixador. Este tipo de pinturas murais pode ser encontrado em abundância em Itália. Os exemplos mais conhecidos são a “Última Ceia” de Leonardo da Vinci ou o teto da Capela Sistina, realizado por Michelangelo.

Já a têmpera são pinturas em que pigmentos ou corantes são misturados com aglutinantes. Os aglutinantes mais usados e conhecidos, usados há bastantes séculos, são aglutinantes naturais, tais como o óleo de linhaça, a clara ou talvez uma emulsão de água. Outro tipo de aglutinantes existentes são os aglutinantes de origem animal. Com outros tipos de aglutinantes podem-se obter óleos e aguarelas. (Caetano, 2011)

Outro tipo de revestimentos são os barramentos, que é uma técnica de acabamento que teve o seu impacto maior durante o período Barroco. Este é composto por cal, pó de pedra ou areia de granulometria controlada, pigmento inorgânico e água. Este pigmento é diluído em água e misturado à massa de cal, adicionando-se em seguida areia ou pó de

pedra. A maneira como se aplica é sobre uma parede húmida, de modo a não fissurar, sobre uma camada de reboco áspero. No entanto, esta é uma técnica difícil de dominar, o que faz com que haja uma exigência quanto ao nível de especialização dos técnicos, principalmente em barramentos coloridos. Esta técnica, devido ao seu elevado custo, acaba por só ter sentido em obras de grande valor histórico ou arquitetónico. (Coelho, Pacheco, & Said, 2009)

As caiações consistem na aplicação de leitada de cal pura ou aditivada com pigmentos. Deve ser usada cal aérea em pasta, bem apagada, em vez de cal aérea em pó, de forma a obter melhores aderências ao suporte e durabilidade superior. A relação entre a cal, o pigmento e a água deve ser bastante precisa. (Coelho et al., 2009)

Através da figura 2, pode-se observar um exemplo de uma caiação, esta no claustro do Convento de Santo António.



Figura 2 – Caiação no claustro superior do Convento de Santo António (Caiar-te, n.d.)

## **1.2 Objetivos**

A finalidade deste trabalho é desenvolver uma calda de injeção de cal aérea que, por um lado seja compatível com as características, por outro que assegure uma reabilitação dos revestimentos durável, através da sua injeção. Outro dos objetivos passa por seguir os procedimentos indicados pela RILEM, tendo como objetivo a obtenção de resultados que possam ser comparáveis com outros testes realizados por outras entidades, de forma a conseguir realizar uma avaliação da calda.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

Esta dissertação está dividida em 4 capítulos, sendo um deles o atual de introdução.

O capítulo 2 refere a importância da cal, dando mais ênfase à cal aérea, sendo esta o ligante utilizado no presente trabalho, promovendo-se um levantamento teórico sobre outras dissertações e *papers* existentes.

O capítulo 3 será dedicado à campanha experimental e à apresentação e discussão dos resultados obtidos, relativos às diferentes formulações de grouts de cal aérea.

Por último o capítulo 4 apresenta as conclusões principais do trabalho, apresentando uma solução final possível e também propostas de trabalhos futuros a desenvolver.

## **2. Grouts de injeção – Influência da cal e o seu contributo na compatibilização de materiais do edificado antigo**

### **2.1 Considerações gerais**

O estudo referente a caldas de injeção para reabilitação de revestimentos tem sido cada vez mais intenso, tanto no restabelecimento de adesão entre camadas como entre o conjunto revestimento/suporte e com isto aproximar de uma preservação do valor cultural existente no edificado.

Além do estudo referente à compatibilidade entre o grout e a camada/suporte, temos também a questão dos materiais. Com o uso frequente deste tipo de solução, injeção de grouts, foi-se evoluindo e estudando o efeito de outros materiais para a obtenção de uma formulação que cumprisse os requisitos, tais como cinzas e aditivos orgânicos.

Hoje em dia, após todos estes anos de aplicação, conclui-se que o uso de caldas de cimentos, pode ser bastante prejudicial por propiciar a degradação acelerada do edificado antigo através das suas resistências excessivas, que não são de todo compatíveis com o suporte e os acabamentos, o que fez com que a cal aérea voltasse a ter um papel crucial na conservação do património, mais especificamente quando se refere à reabilitação dos revestimentos.

### **2.2 Definição de grout**

Em tempos remotos, as argamassas eram basicamente constituídas apenas por cal aérea, areias e, algumas vezes tinham na sua constituição aditivos. Após a descoberta da hidráulica, tudo isto mudou. Atualmente, as caldas aéreas têm um impacto cada vez maior na construção civil, mais propriamente em intervenções de conservação de edifícios, pois acabam por ser o material mais compatível com os revestimentos, tanto a nível de resistências mecânicas, quer de deformabilidade, gerada pela boa interação entre os materiais e soluções construtivas. (Agostinho, 2008)

Os grouts usados para a reabilitação dos revestimentos são uma mistura de uma formulação seca, constituída por vários componentes, com água que se torna numa mistura fluída. O aparecimento de fissurações e/ou vazios, por exemplo, levou a um estudo mais aprofundado às caldas de injeção tendo como finalidade contrariar estas

anomalias. Ou seja, as caldas quando injetadas, consigam restabelecer a aderência entre camadas.

As caldas de injeção geralmente apresentam uma absorção capilar elevada, por outro lado possuem uma grande permeabilidade ao vapor de água, o que permite a evaporação da água que poderá existir no interior dos paramentos. Quando se encontram em ambientes húmidos e com fraca presença de CO<sub>2</sub>, têm maior dificuldade em ganhar presa, visto que o seu endurecimento e desenvolvimento de resistência mecânica se dá através de reações de carbonatação. (Agostinho, 2008)

Contudo é preciso ter-se em conta que grout de injeção e grout estrutural são dois termos distintos e são dois elementos diferentes, logo dar apenas o nome de “grout” a cada um deles é um erro, pois torna-se necessário diferenciá-los.

Também é necessário afirmar que as caldas de injeção de cal aérea nem sempre podem ser utilizadas em certas aplicações pois o seu ganho de presa é bastante lento, tendo como exemplo, casos de preenchimento profundos no assentamento de alvenarias, aplicações em locais de alta humidade relativa, entre outros. (Faria, 2004)

Assim torna-se necessário referir que o desempenho dos grouts de injeção de cal aérea é condicionado em larga escala pelo processo de aplicação em obra. (Agostinho, 2008)

## **2.3 Objetivo da utilização dos grouts em alvenaria antiga**

### **2.3.1 Exigências funcionais**

A tabela 1 resume as exigências funcionais que um grout de injeção deve possuir.

Exigências funcionais de um grout de injeção	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fluidez (1)</li><li>• Injetabilidade (2)</li><li>• Estabilidade (3)</li><li>• Exsudação (4)</li><li>• Segregação (5)</li><li>• Tempo de presa (6)</li><li>• Resistências mecânicas (7)</li><li>• Retenção de água (8)</li></ul>
--	---

Tabela 1 - Exigências funcionais necessárias para um grout de injeção

I. **Fluidez (1)**, segundo (Adami & Vintzileou, 2007) é determinada pela quantidade de água de amassadura, pela distribuição granulométrica dos grãos, bem como da sua natureza, forma e superfície específica das partículas constituintes da argamassa do grout. Contudo a forma como é feita a mistura também vai influenciar bastante a fluidez, tal como o tempo de mistura e a velocidade, isto é, tem de haver uma homogeneização do tempo de mistura para todos os grouts, visto que o objetivo é comparar a forma como estes reagem às mesmas condições. A velocidade de mistura é, também, um parâmetro capaz de influenciar a fluidez de um grout, ou seja, quanto maior a velocidade de mistura mais rapidamente se promove a ligação dos componentes, mas por vezes é necessário ter um certo cuidado, isto porque, em vez de garantir-se um ganho na ligação dos componentes, faz-se com que estes percam parte das suas propriedades.

Quanto à fluidez propriamente dita, o objetivo principal do grout é que esta preencha todas as cavidades existentes, no entanto, não deve ser nem demasiado fluído nem demasiado viscoso.

II. **Injetabilidade (2)** refere-se à medição da capacidade de a calda passar através de uma coluna de areia com dimensões específicas. A injeção pode ser um procedimento de difícil realização, existindo vários fatores que implicam a sua ação, tais como a granulometria da parte sólida e também se tem de ter em conta os fatores que estão diretamente ligados com o suporte e os materiais que o constituem, nomeadamente a absorção de água, a forma e a dimensão dos vazios. Tanto a fluidez como a injetabilidade estão diretamente ligados, pois é necessário garantir uma fluidez tal que quando se realiza a injeção não seja necessário exercer uma pressão maior, que pode levar à queda do suporte e isso é exatamente o contrário do que se pretende.

III. **Estabilidade (3)** de um grout é a capacidade que este possui de forma a manter a homogeneidade, sem ocorrência de exsudação e segregação. Esta exigência está relacionada com a adição de adjuvantes introduzidos na mistura, como fluidificantes, redutores de água ou introdutores de ar e também com a velocidade de realização da mistura. De forma a garantir-se esta exigência, a sua mistura e a velocidade de mistura tornam-se fatores de elevada preponderância. Com a

introdução de finos como as cinzas volantes e sílica de fumo a estabilidade de um grout pode ser melhorada.

IV. **Exsudação (4)** é o fenómeno de movimentação de água para a zona superficial da calda de injeção, promovendo a criação uma película. Este fenómeno é considerado prejudicial pois existe o risco de a calda não consolidar. Assim, exsudação depende da relação água-ligante e da sua distribuição granulométrica. (Abrantes, 2012)

V. A **segregação (5)** é a tendência para os materiais se separarem por camadas. Esta característica necessária para a funcionalidade do grout depende da quantidade de água utilizada, da forma, da dimensão e massa volúmica das partículas e da quantidade de água absorvida pelo provete. Com o aparecimento de segregação, a penetração do grout acaba por se tornar bem mais difícil num meio poroso, que faz com que haja uma variação nos valores das resistências finais. (Eduarda Luso, 2012). Com a segregação ocorre ainda a perda das propriedades mecânicas, ou pelo menos a sua homogeneidade.

VI. **O tempo de presa (6)** deve ser suficientemente longo para permitir a manutenção da fluidez necessária durante a fase de injeção. Varia consoante a temperatura durante a amassadura, temperatura durante a aplicação, quantidade de material misturado e a forma do recipiente de mistura. A velocidade em que decorre a presa aumenta exponencialmente com o aumento da temperatura. Sendo a reação de presa uma reação exotérmica, as condições que impedem a dissipação de calor têm como efeito uma aceleração da presa. (Eduarda Luso, 2012)

VII. As **resistências mecânicas (7)** das caldas devem ser, tanto quanto possível, as mais adequadas ao elemento onde vão ser aplicadas. Se, por um lado, devem contribuir para uma melhoria substancial da coesão e da resistência mecânica do conjunto, por outro lado, esta contribuição não deve ser muito desproporcional ao que já existe. (Eduarda Luso, 2012)

**Retenção de água (8)** é a capacidade que a calda deve ter para reter a água de amassadura dentro da mistura por um período consideravelmente longo, de forma a manter as suas propriedades quando é injetado. Sabe-se que nem sempre é



possível realizar-se a molhagem da parede antes de se dar início à injeção do grout, com o objetivo de se garantir uma determinada percentagem de humidade do suporte e, assim, garantir que não ocorra a migração da água de amassadura. Pode-se concluir que a perda de água de molhagem é muito desfavorável. (Eduarda Luso, 2012)

A Figura 3 representa um esquema que mostra a relação existente entre certas exigências funcionais, ou seja, não se considera que estas funcionem como elementos isolados, mas sim em conjunto.

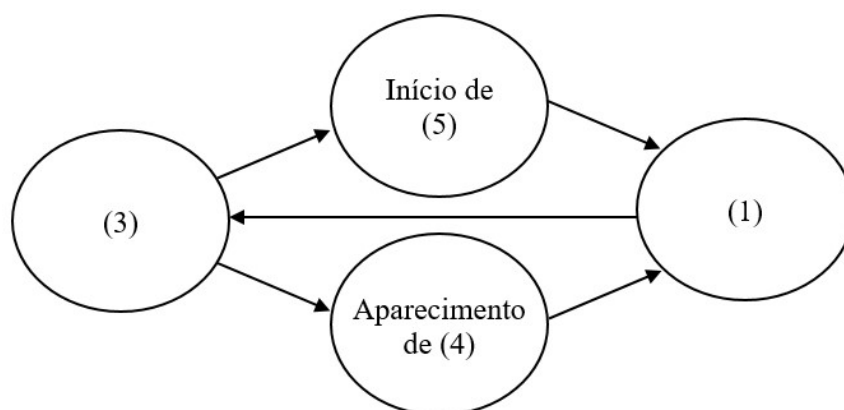


Figura 3 - Esquema da relação entre exigências funcionais dos grouts, 1, 3, 4 e 5

A aderência está diretamente relacionada com a retração, isto é, a retração ocorre em função da evaporação de água da argamassa e também pelas reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes (Maciel, Barros, & Sabbatini, 1998). O excesso de água faz com que o grout tenha um maior volume final, em estado fresco e, quando este atinge o seu tempo de presa, no estado endurecido, tem uma tendência para perder água e retrair. Ou seja, quanto maior a quantidade de água maior será a sua retração porque a diminuição do volume original é muito maior, o que leva o grout a fissurar. Pode-se concluir então o porquê de estes dois parâmetros estarem diretamente ligados e também da retração ter uma influência tão grande na aderência.

Há então a necessidade de estabelecer uma aderência máxima, que não é regulamentar, de forma a não comprometer futuras intervenções.

Genericamente, quase todos os investigadores têm a mesma opinião quanto ao desempenho dos grouts, ou seja, um grout de injeção deve ter boa ligação com os materiais constituintes do suporte, ter pouca ou nenhuma retração, de forma a não criar tensões adicionais, isto porque se limita a perda de adesão entre o grout e o material

existente e ao mesmo tempo reduz-se a penetração de humidade através das fissuras originadas pela retração. Devem ter igualmente uma baixa segregação e exsudação por forma a manter o volume e a consistência, ter uma fluidez e injetabilidade elevada, para promover um fluxo apropriado e preencher aberturas tanto pequenas como grandes e vazios interconectados, mesmo usando pressões baixas. Não menos importante, os grouts de injeção devem também resistir aos sais solúveis, possivelmente presentes nas paredes e limitar o conteúdo de sais que podem ser transmitidos aos materiais existentes. (Eduarda Luso & Lourenço, 2016)

A tabela 2 apresenta os principais requisitos a que devem obedecer os grouts de injeção, de uma forma muito resumida.

Tabela 2 - Quadro representativo dos principais requisitos que os grouts devem ter segundo

Requisitos Reológicos	Pretende-se fluidez durante tempo suficiente e capacidade de penetração uniforme, de modo que todos os vazios sejam preenchidos de igual forma – injectabilidade (propriedades caracterizadas pela homogeneidade, ausência de grumos, com granulometria inferior à dimensão dos vazios a preencher, baixa viscosidade, baixo ângulo de contacto, etc.); De preferência, ausência de segregações (para evitar heterogeneidades); A exsudação deve ser mínima, para diminuir a presença de vazios quando a mistura estiver no estado endurecido;
Requisitos Químicos	Deverá ter características químicas estáveis no tempo, ou seja, ser capaz de formar ligações químicas fortes com o material existente, através de reações irreversíveis; Deverá ser resistente aos sais de sulfato, de modo a evitar a formação de produtos expansivos e eflorescências; O teor de álcalis deverá ser mínimo;
Requisitos Físicos	O tempo de início de presa deverá ser adequado ao tempo necessário à execução da injeção; As propriedades higroscópicas deverão ser caracterizadas por insolubilidade em água e estabilidade volumétrica na presença de humidade; Pretende-se que a calda tenha uma retração baixa;
Requisitos Mecânicos	As características de resistência mecânica e, essencialmente, de rigidez deverão ser similares às da argamassa original ou apenas ligeiramente superiores; As caldas e argamassas deverão ter boa e adequada aderência ao suporte para o bom funcionamento do conjunto;
Requisitos Térmicos	Pretende-se que a calda tenha baixo calor de hidratação para evitar o desenvolvimento de gradientes térmicos que possam prejudicar a aderência ao suporte.

### 2.3.2 Materiais

As caldas de cal são basicamente misturas de cal, neste caso específico cal aérea, água e areia. Apenas com estes componentes consegue-se produzir uma calda de cal, contudo pode não ser possível garantir a durabilidade e compatibilidade dos materiais com o suporte.

Os custos que os materiais poderão ter também é um fator importante porque caso sejam demasiado elevados acaba por se tornar insuportável o uso dos mesmos quando realizadas intervenções em grande escala. (Gomes, 2016)

A figura 4 serve de exemplo para observação duma porção de cal aérea.



Figura 4 - Imagem representativa de uma porção de cal aérea (Sodimate, n.d.)

#### 2.3.2.1 Ligantes

Existem diferentes materiais usados como ligante, mas sendo a cal aérea a ser testada como ligante nesta dissertação, irá apresentar-se de seguida a Tabela 3, que mostra vantagens e desvantagens relativamente à cal aérea como ligante numa calda de injeção.

Tabela 3 - Apresentação de vantagens e desvantagens dos grouts de cal aérea

Tipo de grout	Vantagens	Desvantagens
Cal aérea	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Características compatíveis com o edificado antigo;</li> <li>• Não provocam danos nos elementos da alvenaria, pois são constituídos normalmente por materiais muito porosos e permeáveis;</li> <li>• A nível de trabalhos de consolidação por injeção, são as caldas que melhor desempenham a sua função, garantindo uma compatibilização de características que está intrinsecamente ligada com a compatibilidade de materiais.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistência mecânica muito baixa;</li> <li>• Carbonatação, geralmente, demora um tempo excessivo;</li> <li>• Necessitam de materiais que lhe forneçam um comportamento hidráulico, por forma a ganharem resistências mecânicas mais elevadas;</li> <li>• Baixa funcionalidade estrutural.</li> </ul>

### 2.3.2.2 Agregados

O agregado mais comum nas misturas é a areia, isto porque quando ligada à argamassa faz com que esta ganhe coesão através da ligação dos seus grãos ao ligante. A areia além deste aspeto positivo, também tem outras influências fundamentais tais como, facilita a reação química da carbonatação e também permite distribuir as retrações que possam acontecer.

O tipo de areia utilizado influencia a qualidade da argamassa, isto porque a sua dureza, granulometria e porosidade, entre outros aspetos, afetam as características das argamassas. Quanto maior o volume de vazios da areia, maior alteração a argamassa vai sofrer em termos de porosidade. (Margalha, Veiga, & de Brito, 2007)

Segundo (Paiva, 2005), os agregados têm um papel de extrema importância pois chegam a representar cerca de 70% a 80% da massa final, além de conferirem estabilidade e durabilidade.

Neste caso, a areia que irá ser utilizada será areia de sílica, apresentando-se uma imagem exemplificativa, Figura 5.

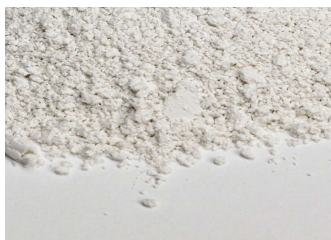


Figura 5 - Areia de sílica (Risalex, n.d.)

#### 2.3.2.3 Água de amassadura

A água é, talvez, dos elementos mais importantes na constituição do grout. Embora seja um elemento de extrema importância, também apresenta desvantagens que, caso sejam ignoradas, podem interferir com o desempenho do grout. Tendo em conta que a mistura do grout é uma formulação seca, a água é o elemento que irá conferir a este a alteração do estado sólido para o líquido, promovendo uma melhor ligação entre os seus constituintes. A fluidez do grout é um dos principais aspetos e, como a água é um fator preponderante no seu aumento, a percentagem de água a ser utilizada deve ser testada. É necessário referir que a água deve estar compreendida, normalmente, num intervalo entre 60% a 80%, podendo variar de valores, tendo em conta a diversidade de formulações existentes.

Um dos maiores aspetos negativos e com mais impacto no grout de injeção é o excesso de água adicionado. A adição de água de amassadura em excesso faz com que o volume final de grout seja muito maior. Quando este atinge o seu tempo de presa, ocorre uma absorção de água natural, o que faz com que o grout tenha um processo de retração. Caso a quantidade de água presente no grout seja excessivo, então este vai sofrer uma retração maior, o que consequentemente pode levar a que este sofra fissurações excessivas, dando-se a sua separação do suporte, isto é, que não garanta a aderência necessária para o qual foi concebido.

Conclui-se que o fator mais influente na trabalhabilidade do grout em fresco é o teor em água de amassadura, entendendo-se então trabalhabilidade como a facilidade com que se manuseia e aplica o grout. Não é um aspeto fácil, pois pequenas variações no teor em água, faz com que ocorram mudanças significativas no comportamento reológico dos grouts de injeção. (Paiva, 2005)

#### 2.3.2.4 Adjuvantes e/ou Aditivos

Adjuvante é a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa de cimento, adicionada durante a amassadura aos componentes normais das argamassas e betões, com a finalidade de modificar certas propriedades destes materiais, quer no estado líquido, quer no estado sólido ou na passagem de um estado para o outro. (Paiva, 2005)

Neste aspeto dos adjuvantes, os superplastificantes, agentes redutores de água, agentes retentores de água podem ser uma solução eficaz para resolver o possível problema que haja, a fim de se garantir a estabilidade, durabilidade, fluidez, entre outros aspetos. Por exemplo, a presença de plastificantes na composição do grout afeta a porosidade e a resistência. (Fortes-Revilla, Martínez-Ramírez, & Blanco-Varela, 2006)

Existem inúmeros adjuvantes, cada um atuando em diferentes propriedades e respondendo a diferentes necessidades, por exemplo, se se aumentar a fluidez da mistura através da utilização de superplastificantes, aumenta-se a injetabilidade do grout de injeção de cal aérea. (Manzouri, Schuller, Shing, & Amadei, 1996)

Os adjuvantes mais comumente usados para grouts de injeção de cal são os superplastificantes, agentes retentores de água e polímeros.

Normalmente, são selecionados para responderem a uma necessidade primária, no entanto estes podem introduzir efeitos secundários, como por exemplo, os agentes redutores de água, que possuem também um papel de retardadores de presa.

Os **fluidificantes** (ou plastificantes) são responsáveis pelo aumento da trabalhabilidade do grout sem a adição de uma maior quantidade de água. No entanto, o uso excessivo de fluidificante não é aconselhável, pois dificulta as reações de hidratação da argamassa, podendo levar o grout a não obter o endurecimento pretendido. (Tavares, 2009)

Citando (Schueremans, Van Rickstal, Venderickx, & Van Gemert, 2003) é impossível dar-se a criação de um grout sem se recorrer ao uso de superplastificantes pois, teria de se recorrer a uma quantidade excessiva de água de amassadura para tornar o grout fluído, sendo que isto levaria a uma perda de estabilidade.

Os **agentes retentores de água**, figura 8, são importantes para a realização de grouts, retendo a água de amassadura até este atingir a presa. Além da retenção de água, tornam o grout fique mais espesso, promovendo um aumento da viscosidade, coesão dos materiais, redução da segregação e melhoram a homogeneidade e trabalhabilidade das argamassas. (Paiva, 2005)

Através da figura 6, pode-se observar um exemplo de um agente retentor de água, neste caso, do Walocel.



Figura 6 - Walocel, agente retentor de água usado neste trabalho (Dow Construction Chemicals, n.d.)

**Agentes introdutórios de ar**, previnem o efeito gelo-degelo e aumentam a durabilidade do grout de injeção. Ajudam a melhorar a estabilidade e promovem redução da fluidez.

Os aditivos, segundo a RILEM (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais de Construção, Sistemas e Estruturas), são qualquer material adicionado ao betão ou argamassa durante a mistura, de forma a melhorar-se as propriedades tanto no estado fresco como no estado endurecido, entrando em percentagens superiores a 5% da massa de cimento.

A distinção entre aditivos e adjuvantes não se torna fácil e tem vindo a ser estudada a diferença entre os dois, no entanto, em termos concretos a diferença esteja na percentagem com que entram no volume total do grout. Ambos procuram alterar as propriedades da argamassa, acabando por não ser incorreto afirmar que o mesmo material pode ser aditivo e adjuvante ao mesmo tempo.

Alguns exemplos de aditivos que são utilizados nos grouts são pozolanas, cinzas volantes e sílicas de fumo, entre outros.

A definição de pozolanas é-nos dada pela norma ASTM C593-95, intitulada como Especificação padrão para cinzas volantes e outras pozolanas para uso com argamassa para a estabilização do solo, e refere que as pozolanas são definidas como materiais

siliciosos ou silico-aluminosos que possuem poucas ou nenhuma propriedades cimentíceas mas que, finalmente divididos e na presença da humidade reagirão quimicamente com álcalis e hidróxidos alcalino-terrosos a temperaturas vulgares formando ou ajudando à formação de compostos com propriedades cimentíceas.

Segundo (Velosa, 2006), as pozolanas podem-se dividir em dois grupos consoante a sua origem, as pozolanas naturais e artificiais. Dentro das naturais, que têm uma origem vulcânica, tem-se as pedras-pomes e perlites, enquanto que as de origem artificial, que são produzidas industrialmente, tem-se as cinzas volantes, metacaulinos e escórias de alto forno.

Atualmente, o estudo da adição de pozolanas já se tornou tão vasto, embora ainda haja muito a descobrir, que permite concluir que estas têm variadíssimas vantagens quando misturadas com a cal. As vantagens são o aumento do poder aglomerante, menor calor de hidratação, diminuição da exsudação, melhoramento na estanquidade, fluidez e segregação e na resistência aos sulfatos e maior longevidade da calda. Esta adição de pozolanas faz com que se possa obter melhores resultados em termos de aderência. (Eduarda Luso, 2012)

Citando (Velosa, 2006), “Tendo como ligante a cal e sendo a proporção de pozolana variável conforme a aplicação, será possível criar argamassas com diferentes propriedades, ajustáveis à finalidade em questão e, principalmente, com resistências mecânicas moderadas. Argamassas com incorporação de elementos pozolânicos parecem ter uma elevada durabilidade (...).”



## 2.4 Técnicas de injeção de grouts

Existem várias técnicas de injeção de grouts e a forma como se procede à injeção é um aspeto importante. Uma injeção deficiente pode levar ao colapso do suporte, daí ser necessário que este trabalho seja realizado por pessoal especializado ou trabalhadores fiscalizados.

Antes de se proceder à injeção existem cuidados prévios a ter em conta, bem como a definição das zonas danificadas onde se perdeu a aderência, no entanto, neste caso é necessário fazer o diagnóstico com recurso a ensaios não destrutivos para não danificar mais a estrutura. Como complemento, segundo (Tavares, 2009), é necessário proteger-se o revestimento, isto é, quando está eminente o seu destacamento, pode-se e deve-se colocar papéis ou tecidos juntamente com adesivos, preservando o revestimento existente. Antes de se promover intervenções de injeção de grouts é necessário haver uma prévia preparação do substrato. Faz-se a limpeza dos detritos que se aglomeram nas fissuras, por aspiração, através de zonas de vácuo, de dimensões reduzidas, objetivando a limpeza de todo o tipo de detritos existentes nas cavidades. Outra forma de limpeza das fissuras ou vazios é utilizando água ou água e álcool.

A água não é apenas utilizada para limpeza das cavidades, é também utilizada para facilitar a passagem do grout de injeção, garantindo uma melhor aderência do grout atrasando a sua presa.

Antes da injeção do grout procede-se à remoção de qualquer tipo de vegetação, etapa elaborada especialmente no caso de mosaicos de pavimento ou piso, e de sistemas de raiz pois podem impedir que o grout flua adequadamente.

Após preparação do substrato, deve-se efetuar a limpeza da área a ser tratada, removendo agentes biológicos e possíveis consolidantes aplicados anteriormente.

Se houver necessidade de aceder a locais de difícil acesso, pode-se aplicar desinfetantes através da aspersão ou recorrendo a escovas. A remoção dos consolidantes antigos tem de ser cautelosa, tendo como objetivo a remoção exclusiva do consolidante e não do revestimento original. Por fim, lava-se abundantemente com água, mas de forma cuidadosa. (Gomes, 2016)

Caso sejam zonas ocas e ainda não possuam vazios para serem preenchidos, procede-se à abertura de orifícios. Citando (E. Luso, Lourenço, & Ferreira, 2007), disposição, tamanho e quantidade de furos deve ser realizada consoante a espessura, morfologia e

estado de degradação do revestimento e que estes devem ser realizados ao longo das fissuras e com inclinação tal de forma a que se consiga preencher completamente vazios e destacamentos.

O suporte, geralmente, tem um grande poder absorvente, logo é necessário que este seja humedecido, caso contrário o suporte iria absorver toda a água presente no grout, originando retrações aceleradas, levando a uma perda de aderência instantânea.

Por fim realiza-se a injeção e esta pode ser feita de 4 maneiras distintas, injeção manual, injeção mecânica, gravidade e pistolas elétricas.

No entanto, o método de injeção mais corrente e, talvez o mais acessível, é da injeção manual. É realizada através de seringas, controlando-se mais facilmente a pressão exercida.

A injeção manual, pode ser dividida em dois tipos de injeção, por gravidade e sob pressão. Através da figura 7, apresenta-se a técnica de injeção manual sob pressão, sendo esta a técnica mais usual.

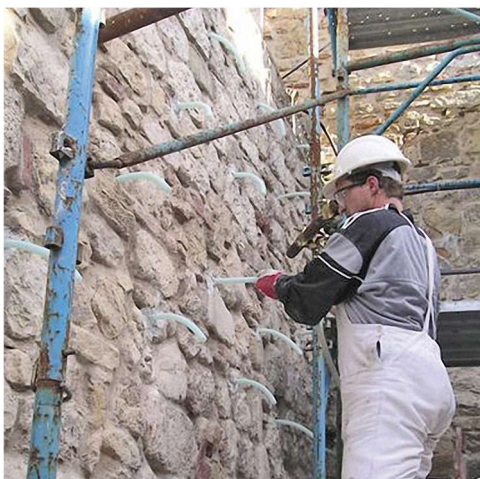


Figura 7 - Injeção do grout sob pressão em obra (Indiamart, n.d.)

Quando se procede à injeção do grout numa cavidade particularmente larga, esta deve ser realizada por etapas, fazendo com que em cada etapa que se aplique grout haja tempo para este perder a água e tornar-se muito seco e endurecido.

Quando se aplica pressão na área onde se injeta o grout consegue-se ao mesmo tempo realinhar o gesso fissurado e garantir assim uma melhor adesão e superfície de contacto. (Rainer & Beril Biçer-Şimşir, 2013)

Embora possa parecer algo fácil de realizar, a injeção tem de ter um procedimento, tentando fazê-lo da forma mais correta possível. Não é de todo fácil, não sendo perceptível se o grout atinge a zona de reparação pretendida. Necessário referir que não é aconselhável

passar o valor da pressão máxima estabelecida, que é de 2 bars. A injeção deve ser feita de forma lenta, de forma a não ocorrer a criação de bolhas de ar e deverá também ser realizado numa altura inferior a 1 metro/dia para que as pressões hidrostáticas das caldas não danifiquem a estrutura. (E. Luso et al., 2007)

## **2.5 Propriedades de trabalho e características de desempenho dos grouts**

O objetivo passa pela avaliação do comportamento do grout no estado molhado inicial, durante o ajuste e depois de ter atingido a cura, logo é necessário garantir que um número mínimo de propriedades seja testado. Caso se pretenda comercializar os grouts, a otimização de certos parâmetros deve ser realizada, garantido assim que estes tenham o melhor desempenho possível, parâmetros como injetabilidade, fluxo e enchimento.

Os grouts de misturas personalizadas devem ser submetidos a testes laboratoriais, avaliando-se todas as propriedades presentes e a sua reação. Se o objetivo passar pela produção de grouts com propriedades específicas, recorre-se a ensaios adicionais para um estudar mais concreto. A validação dos testes aos ensaios laboratoriais, tanto para grouts de misturas personalizadas como para grouts disponíveis comercialmente, é feita in situ, verificando-se como estes se comportam.

Assim, é necessário garantir que os grouts de injeção têm de satisfazer certos critérios de desempenho, tais como:

- Compatibilidade entre o grout e o substrato original ou com os materiais com que a superfície é constituída;
- Garantia de fluidez tal que o grout ao ser injetado não entupa;
- Necessidade de os componentes terem uma separação mínima;
- Garantir que o grout, desde pasta molhada até sólido endurecido, tenha um volume de encolhimento mínimo;
- Garantir que haja a mais pequena concentração de sais solúveis possível;
- A força mecânica do grout injetado curado deve ser igual ou inferior à do gesso e do substrato para prevenir que se formem pressões/extensões exageradas no material original;
- Absorção de água por capilaridade do grout de injeção curado deverá ser igual ou semelhante à do material original.

- O vapor de água que existe, proveniente da permeabilidade do vapor de água dos materiais originais deve ser permitido pelo grout endurecido e não deve permitir que haja uma barreira de vapor.
- O grout deve garantir uma ligação forte e uma ligação adequada nas interfaces deve ser sempre semelhante, mas menor que a força existente nos materiais originais

É importante avaliar o controlo de qualidade dos componentes dos grouts de injeção, sabendo que há um especial interesse quando estes são usados, sendo crucial o uso de materiais com qualidade elevada garantindo-se a consistência, eficiência e qualidade dos grouts. Contudo, as componentes física e química nem sempre devem ser comparadas diretamente com as propriedades dos materiais e de desempenho e, o estudo de resultados das análises materiais, mais especificamente dos grouts comerciais que são constituídos por inúmeros aditivos, tais como plastificantes e biocidas, não é direto.

Existem outros tipos de métodos de ensaio que são os testes de durabilidade, que retratam certos parâmetros como a resistência à congelação e descongelação e resistência dos sais solúveis. Sendo que estes testes conseguem fornecer informação do desempenho de betão, tijolos e argamassas, este conteúdo é apenas relativo. Quando falamos de grouts de injeção, fazer comparações em termos de resultados de testes de durabilidade diretamente com o desempenho na prática torna-se ainda mais complicado, visto que os grouts são injetados nos sistemas compósitos e não são diretamente expostos a certas condições. (Rainer & Beril Biçer-Şimşir, 2013)

## **2.6 Métodos de ensaio**

### **2.6.1 Testes laboratoriais qualificados para grouts de injeção**

Estes métodos permitem a determinação de propriedades dos grouts que são fundamentais para o seu desempenho e compatibilidade a nível do sistema arquitetónico. Os testes laboratoriais dividem-se em 3 grandes grupos:

- Testes que determinam as propriedades de trabalho;
- Propriedades durante a presa e o endurecimento;
- Propriedades endurecidas.

### 2.6.2 Preparação dos grouts de injeção

Apresentam-se, de seguida, os passos dos procedimentos que são usados no GCI para se proceder à mistura:

- Verter água pré-medida e, caso seja possível, adicionar aditivos líquidos dentro da bacia de mistura;
- Adicionar, em não mais que 30 segundos, ingredientes molhados pré-misturados, sendo a mistura feita a uma velocidade lenta, isto é, entre 200 a 300 rotações por minuto, usando-se um agitador de velocidade variável;
- Depois de feita a mistura a velocidade lenta, aumenta-se a velocidade para valores entre as 1000 e as 2000 rotações por minuto, deixando misturar no mínimo por 4 minutos;
- Depois de concluída a mistura, passar o grout ainda fresco por um peneiro de 1 mm fazendo-se a remoção de qualquer tipo de impureza que este contenha e isto, por consequência, faz com que se proceda à injeção do grout com maior qualidade.

Pela Figura 8, mostra-se o tipo de misturadora e os moldes finais que o GCI definiu para se preparar um grout de injeção.

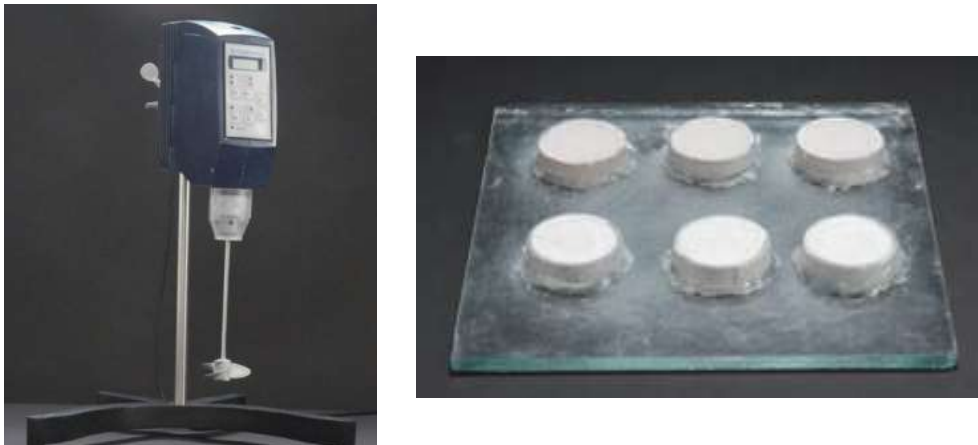


Figura 8 - Misturadora e moldes dos grouts preparados (Biçer- Şimşir & Rainer, 2013)

## 2.7 Ensaios experimentais a realizar, concebidos pelo RILEM

A tabela 4 resume os ensaios, tanto no estado fresco como no estado endurecido, propostos pela RILEM.

Tabela 4 - Esquema dos ensaios a serem realizados para caracterização dos grouts de injeção

Ensaios aos grouts no estado fresco	Retração
	Expansão e Exsudação
	Teste do cone de fluidez
	Injetabilidade
Ensaios aos grouts no estado endurecido	Módulo de elasticidade
	Resistência à flexão
	Resistência à compressão
	Carbonatação (área não carbonatada)
	Absorção de água por capilaridade
	Aderência ao suporte

### 2.7.1 Expansão e Exsudação

#### 2.7.1.1 Descrição

Este ensaio permite determinar a alteração do volume da mistura e acumulação de água segregada à superfície do grout fresco. Grouts que são bem formulados e realizados nas proporções certas não devem apresentar visíveis segregações ou sangramentos.

Segregação ou exsudação excessiva de um grout irá mudar as suas propriedades e causar entupimento durante a sua injeção.

Este ensaio é realizado como complemento da ASTM C 940, que é relativo à expansão e exsudação de misturas de grouts frescas para betão agregado em laboratório. Não obstante, este ensaio também é realizado com o auxílio da norma EN 445.

(Vintzileou, 2006) afirmou que, caso ocorram exsudações maiores que 5% esta é considerada excessiva, pois caso este fenómeno aconteça afeta a qualidade do grout, pois a separação da água do grout fica na parte superior deste fazendo com que o grout endureça lentamente.

O grout é colocado num cilindro de vidro graduado e a mudança de volume total e o rácio de acumulação de água sangrada na superfície do grout é observada durante um período de tempo. O volume de exsudação como volume total de um grout é uma indicação da extensão de separação das fases líquidas e sólidas. Pode ser usada para aceder há quantidade de água de amassadura de um grout específico.

Grouts de injeção de cal aérea mostram uma expansão mínima devida ao calor de hidratação, conteúdo alcalino e formação de produtos hidratados.

Em certos casos, alguma expansão pode ser também desejável.

É importante determinar a expansão de um grout de injeção de cal aérea quando a injeção do grout inclui aditivos que facilitam a expansão e, em alguns casos, geram gases, com o objetivo de evitar que causem dano às superfícies arquitetónicas.

Neste ensaio procedeu-se a uma adaptação do volume de grout testado, passando-se de  $800 \pm 10$  mL para  $400 \pm 10$  mL, visto que misturar 800 mL de grout pode ser um desafio bastante grande.

Para este tipo de ensaio, a temperatura da sala ou do espaço tem de ser  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Todos os materiais molhados e água de amassadura devem ser armazenados nas mesmas condições.

#### **2.7.1.2 Equipamento e material utilizado**

- Cilindro de vidro graduado de 500 mL, com graduação de 10 em 10 mL;
- Cilindro de vidro graduado de 25 mL, com graduação de 1 em 1 mL;
- Seringa de 10 mL com cânula;
- Termómetro;
- Parafilm ou outro tipo de plástico impermeável que previna a evaporação da água de exsudação para o exterior, durante o teste.

#### **2.7.1.3 Procedimento**

1. Colocar o cilindro de vidro graduado, com volume máximo de 500 mL, sobre uma superfície livre de qualquer tipo de vibração.

2. Misturar o grout e imediatamente medir e registrar a temperatura que se encontra no local. A temperatura, como referido anteriormente, deve estar por volta dos  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
3. Introduzir o grout no cilindro graduado até se atingir o volume de  $400\text{ mL} \pm 10\text{ mL}$ . A medição do volume deve começar imediatamente após 3 minutos de mistura.
4. Cobrir o topo do cilindro graduado usando Parafilm, de forma a se prevenir a evaporação da água sangrada.
5. Registrar o volume inicial total da amostra ( $V_0$ ) e o tempo em que se retirou este registo.
6. Anotar o volume final, na superfície superior da camada, de exsudação que se obteve ( $V_t$ ) e na superfície superior da argamassa ( $V_g$ ), perto de 5mL em intervalos de 15 minutos durante os primeiros 60 minutos, e a seguir, em intervalos de 1 hora até não se registar qualquer alteração no volume final do grout após duas leituras consecutivas.
7. No final do teste, transferir este volume de água sangrada para o cilindro de vidro de 25 mL graduado, inclinando o cilindro e extraindo a água sangrada com uma seringa. Anotar o volume final de exsudação ( $V_w$ ) para um valor perto de 0,5 mL.

A figura 9 resume o final do ensaio, faltando apenas retirar os valores relativos a expansão e exsudação, caso existam.

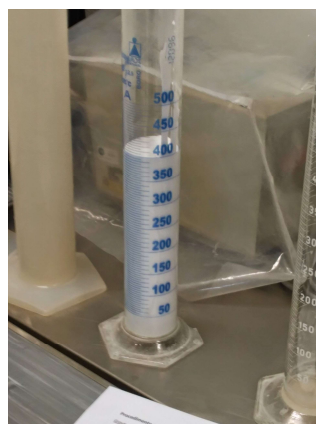


Figura 9 – Ensaio de expansão e exsudação



## **2.7.2 Retração**

### **2.7.2.1 Descrição**

A importância do estudo do fenómeno de retração dos grouts está interligada com a qualidade e durabilidade dos revestimentos.

Este ensaio permite avaliar como o grout retrai durante o processo de endurecimento. A quantidade de água de amassadura é importante, sendo ela o elemento que pode fazer com que haja mais retrações ou não, devido ao excesso de volume final que pode introduzir. Um grout que retraia tem o seu desempenho comprometido. A retração num grout torna-se visível pela presença de fissuras, levando a uma possível falta de aderência entre o grout e o suporte em questão. (Figueiredo, 2013)

### **2.7.2.2 Equipamento e material utilizado**

- Caixa de Petri;
- Termómetro;
- Régua graduada ao mm.

### **2.7.2.3 Procedimento**

1. Colocar a caixa de Petri sobre uma superfície lisa e isenta de vibrações;
2. O material sobranete do ensaio de expansão e exsudação será usado para se realizar este ensaio. Assim, o material que sobre na panela usada para se proceder à mistura do grout é vertido para a caixa de Petri, até esta estar totalmente cheia;
3. Colocar a caixa de Petri com o grout na estufa com 65% de humidade relativa e esperar que o grout atinja um certo grau de endurecimento;
4. Observar o grout endurecido e anotar a presença de fissuras ou não. Caso tenha, anotar se as fissuras se dão superficialmente ou ena zona de aderência entre o grout e a caixa de Petri.

A figura 10 representa o final do ensaio da retração, mostrando o grout já endurecido com a presença de fissuras.



Figura 10 - Imagens do ensaio de retração a grouts de injeção de cal aérea

### **2.7.3 Ensaio do teste do cone de fluidez**

Este ensaio rege-se pela norma europeia NP EN 445 e tem como objetivo a determinação do tempo que é necessário para que se escoe um determinado volume de um grout de injeção.

#### **2.7.3.1 Equipamento e material utilizado**

- Cone de Marsh com 10mm de orifício inferior;
- Peneiro de 1mm;
- Cronómetro;
- Cilindro graduado de 25 mL;
- Espátula;
- Termómetro;
- Garra e suporte;
- Esguicho de água.

#### **2.7.3.2 Procedimento**

1. Após realização da mistura, faz-se passar por um peneiro com malha de 1 mm, removendo grumos/aglomerados;

2. Depois de todo o grout ter passado, enche-se o cone, humedecido previamente, tapando-se o orifício inferior enquanto se procede ao enchimento;
3. Abre-se o orifício inferior, deixando o grout escorrer até ao fim, registando-se através do cronómetro o tempo que demorou até este escorrer;
4. Ao mesmo tempo que se abre o orifício inferior e se regista o tempo de fluidez, regista-se também o tempo que leva a encher 200/500 mL.

A figura 11 demonstra a realização do ensaio do cone de fluidez.



Figura 11 - Ensaio do cone de fluidez para os grouts de injeção

## 2.7.4 Injetabilidade

### 2.7.4.1 Descrição

Ensaio com o objetivo de determinar a capacidade do grout em preencher ligações capilares de diferentes materiais granulares, molhados ou pré-humedecidos, sobre constante pressão. A injetabilidade é uma propriedade crucial em grouts de injeção, que terão de ter a capacidade de serem injetados quer por uso de uma seringa ou por um tubo para preencher fissuras internas ou vazios.

É o ensaio onde se espera a representação de uma situação, idêntica ou parecida, tal e qual como se espera em obra. Permite testar a injetabilidade por gravidade ou sob pressão.

Este ensaio é a adaptação do ensaio de coluna de areia (EN 1771) que é usado para grouts de injeção para superfícies arquitetónicas. O grout é injetado sobre pressão constante

numa coluna, que consiste num tubo de plástico transparente, com material granular. A coluna é mantida verticalmente e o grout é injetado pelo topo do tubo. Caso existam vazios ainda para serem preenchidos tenta-se encher com material granular, por exemplo areias com certas dimensões. A distância que o grout penetra na coluna e o tempo correspondente são usados para desenhar a curva que indica o valor de injetabilidade. Caso seja numa ligação capilar a injetabilidade do grout é feita com uma pressão pré-definida, sendo esta definida pela relação da distância feita pelo grout com o tempo que demora a ser injetado.

#### **2.7.4.2 Equipamento e material utilizado**

- Tubo de plástico rígido, que seja transparente, com um diâmetro total de cerca de 23mm;
- Areia com dimensões < 2mm;
- Seringa com 50 mL de volume;
- Suporte e garra, de forma a poder-se assegurar a estabilidade do tubo de plástico, enquanto se realiza o processo de injeção;
- Cronómetro.

#### **2.7.4.3 Procedimento**

1. Preparação da coluna, enchida com areia com dimensões entre 4 e 6 mm, em que através da garra e do suporte se consegue fixá-la verticalmente, sem sofrer futuras vibrações;
2. Colocar no topo do tubo um material de borracha com um tubo que permita a injeção;
3. Preparar a mistura do grout e encher totalmente uma seringa, com capacidade de 50 mL de volume total, sem que antes se meça e registe a temperatura a que o grout de injeção se encontra;
4. Depois da injeção de metade da quantidade da seringa, isto é, 25 mL de grout, regista-se o tempo que se demorou a injetar esta quantidade;
5. Por fim, caso se consiga introduzir toda a quantidade de grout presente na seringa, regista-se esse mesmo tempo. Caso não se consiga injetar a quantidade total,

anota-se a quantidade injetada e o tempo que levou a injetar essa quantidade, procedendo-se posteriormente ao cálculo do refugo, que é a quantidade de material que sobrou.

O ensaio de injetabilidade pode ser observado através do auxílio da figura 12, apresentada de seguida.



Figura 12 – Ensaio de injetabilidade, neste caso por gravidade

## 2.8 Ensaaios experimentais no estado endurecido

### 2.8.1 Execução dos provetes

Após se realizar todos os ensaios necessários para verificar os parâmetros do grout de injeção em estado fresco, realizaram-se 3 provetes para cada formulação.

Os provetes realizados serão avaliados posteriormente quanto ao módulo de elasticidade, resistência mecânica, área não carbonatada e absorção de água por capilaridade.

Os moldes metálicos que se utilizaram obtenção dos provetes prismáticos têm dimensões de 40x40x160 mm, foram previamente limpos e posteriormente oleados, usando-se óleo descofrante, com o auxílio de um pincel, de forma a realizar muito mais facilmente a desmoldagem e evitar fissuração no ato de desmoldagem. (Carvalho, 2014)

Como os grouts preparados eram muito fluídos não se recorreu ao uso do compactador, como é o mais comum, mas procedeu-se ao uso de 25 pancadas de cada lado do molde para terem a mesma compactação.

Este ensaio é realizado consoante a norma EN 1015-11 (CEN, 1999a), sendo que não se seguiu à regra as 60 pancadas, pois como os grouts em questão eram demasiado fluídos, foi muito fácil compacta-los.

Posteriormente, os moldes foram colocados numa sala climatizada, com humidade relativa entre os  $65\% \pm 5\%$  e uma temperatura a rondar os  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , durante 7 dias, de acordo com a norma. Após estes 7 dias, com o auxílio de um martelo, procedeu-se à sua desmoldagem, mantendo-se durante 21 dias na mesma sala climatizada de forma a ganharem a cura pretendida.

### **2.8.2 Ensaio de aderência (Pull-off)**

O ensaio de aderência por tração direta é também conhecido como ensaio de pull-off. A força de tração é transmitida axialmente a uma peça metálica, que pode ser redonda ou quadrada, que é colada previamente ao provete, com o auxílio de uma cola epoxídica, composta por dois componentes, adesivo e endurecedor, que é baseada em resina, de endurecimento acelerado, utilizada para fixar as peças metálicas aos grouts de injeção. O aumento gradual da força pode ser observado diretamente no manómetro, onde se lê a força de arrancamento. Após o arrancamento efetua-se uma análise visual da superfície de rotura que pode ocorrer de 3 formas:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva no revestimento;
- Rotura coesiva no suporte.

Pela análise da figura 13, observa-se os três tipos de rotura existentes e como se manifestam.

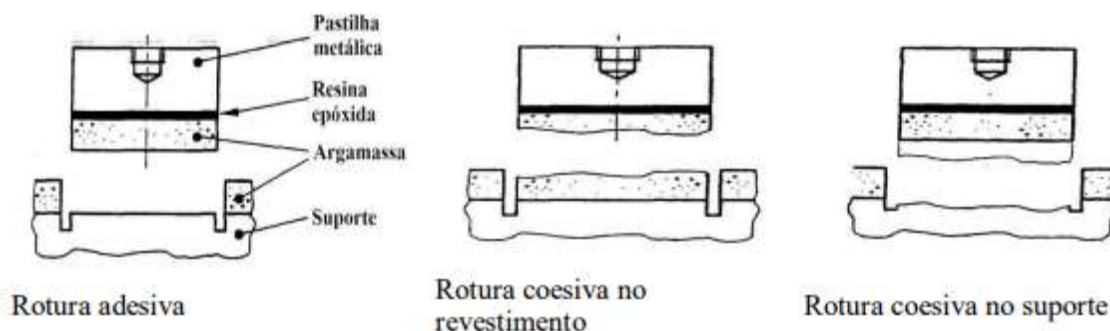


Figura 13 - Exemplo dos tipos de rotura existente, sendo que a mista é uma mistura dos dois tipos de rotura apresentados (Ferreira, 2012)

Antes deste ensaio ser realizado, fez-se provetes de cal aérea, usando “tupperwares”, que endureceram em estufa durante 28 dias. Sendo a cal aérea um material de consolidação lenta, optou-se por deixar os provetes mais de meio ano em estufa.

Cortou-se um tubo de PVC com dimensões 15x3 cm, inserido na mistura de grout fresco antes de ir para estufa, servindo como molde, para posteriormente verter-se o grout.

Por fim, verteu-se a mistura de grout para cada provete.

Assim, após os 28 dias de cura, procedeu-se à colagem das pastilhas metálicas no provete. Mesmo antes de se realizar este contacto, é necessário regularizar a superfície do provete, de forma a garantir que ocorra uma boa ligação entre a pastilha metálica e o provete, e também reduzir a quantidade de cola, isto porque quanto mais irregular for a superfície, mais cola tem de ser aplicada para preencher os poros e pior é a colagem. Para regularizar a superfície do provete, normalmente, recorre-se ao uso de uma lixa ou de uma pedra de desgaste. Como os provetes de cal são muitos mais frágeis que os grouts cimentícios, então usa-se a lixa.

Como neste caso específico não houve irregularidades assinaláveis, então optou-se por não realizar esta etapa, evitando danificar os provetes.

A cola é de dois componentes, pelo que é necessário misturá-los previamente. A colagem da pastilha metálica tem de ser efetuada 48 horas antes do ensaio, garantindo-se o endurecimento da cola.

Por fim, regista-se o valor da tensão máxima e o tipo de rotura.

A figura 14 resume a colocação das pastilhas metálicas bem como o ensaio de aderência.



Figura 14 - Colocação das pastilhas metálicas, 48h antes e posterior ensaio de aderência

### 2.8.3 Módulo de elasticidade (Pundit)

Ensaio que permite determinar a velocidade de propagação dum impulso ultrassónico, entre dois pontos, tendo em vista obter informações sobre a porosidade, homogeneidade e a presença de fendas e defeitos nas argamassas. Este é um ensaio não-destrutivo, logo não danifica qualquer tipo de provete.

Em primeiro lugar, procede-se à calibração do aparelho. Seguidamente, coloca-se uma massa de contacto no provete, na zona onde os transdutores estarão em contacto, ou seja, nas extremidades, garantindo assim uma melhor área de contacto entre o provete e os transdutores. Posteriormente, mede-se os valores do tempo de propagação. (Carvalho, 2014)

O valor da velocidade de propagação da onda é dado pela seguinte fórmula:

$$V = \frac{d}{t} [\text{Km/s}] \quad (1)$$

sendo,

V – Velocidade de propagação dos ultra-sons (Km/s);

d – Comprimento do provete (mm);

t – Tempo de percurso da onda ( $\mu\text{s}$ ).

Posteriormente, calcula-se o módulo de elasticidade dinâmico de cada provete, através da seguinte fórmula:



$$Ed = V^2 \times \rho \times \frac{(1+\nu) \times (1-2\nu)}{(1-\nu)} [MPa] \quad (2)$$

em que,

Ed – Módulo de elasticidade dinâmico (MPa);

V – Velocidade de propagação dos ultra-sons (Km/s);

$\rho$  – Densidade real do material, que é dada por  $\rho = \frac{m}{(d \times l \times h)}$ , (Kg/m<sup>3</sup>);

$$\frac{(1+\nu) \times (1-2\nu)}{(1-\nu)} \approx 0,9.$$

#### 2.8.4 Resistência à tração (Rt)

Os provetes prismáticos utilizados para medir a resistência à tração por flexão têm as dimensões de 40x40x160 mm, dimensões normalizadas.

Realizado segundo a norma EN 1015-11 (CEN,1999b), é um ensaio destrutivo e consiste na determinação da resistência à flexão através da aplicação de uma carga a meio vão do provete prismático.

O aparelho utilizado é da marca Shimadzu e que possuía uma célula de carga de 5 KN e de 100 KN.

Regista-se a carga máxima suportada pelo provete mesmo antes de se dar a rotura e calcula-se a resistência à flexão do provete:

$$fcf = \frac{1.5 \times Ff \times l}{d_1 \times d_2^2} [MPa] \quad (3)$$

sendo,

fcf – resistência á flexão (MPa)

Ff – carga máxima aplicada à flexão (N)

l – distância entre os roletes inferiores de apoio (mm)

d1 e d2 – dimensões laterais do provete (mm)

No final, calcula-se as médias dos três ensaios, obtendo-se as tensões de rotura à flexão, de cada grout.

### 2.8.5 Resistência à compressão ( $R_c$ )

Ensaio realizado após o ensaio da flexão, usando os meios provetes prismáticos dele resultante. Centra-se os provetes e desce-se a célula até estarem em contacto, aplicando-se uma carga gradualmente crescente, constante, até que se verifique a rotura do provete. Regista-se a força de rotura e calcula-se a tensão de rotura à compressão:

$$f_c = \frac{F}{A_c} [\text{MPa}] \quad (4)$$

sendo,

$f_c$  – Tensão de rotura à compressão (MPa)

$F$  – Carga máxima aplicada quando se dá a rotura (N)

$A_c$  – área da secção transversal do provete na qual a força de compressão foi aplicada ( $\text{mm}^2$ )

Por fim, calcula-se a média de três ensaios.

### 2.8.6 Carbonatação

Para avaliação da carbonatação nos provetes prismáticos de grouts de cal irá recorrer-se ao uso de uma solução de fenolftaleína, sendo este o indicador de pH corrente. (Agostinho, 2008) afirma que o uso da solução de fenolftaleína possui algumas limitações na avaliação da carbonatação, isto porque através de ensaios realizados verificou que, geralmente, a superfície das argamassas já carbonatada continuava a ganhar resistência. Isto pode significar que o processo de carbonatação continuava a decorrer.

A carbonatação origina a redução de pH, visto que o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) é alcalino e o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) é neutro. Basicamente, este ensaio consiste em borrifar com a solução de fenolftaleína a superfície de rutura do provete prismático, observando-se posteriormente a cor apresentada.

Após borrifar-se a dada superfície, se apresentar determinadas zonas rosadas, significa que ainda não estará carbonatada, ou vice-versa, isto é, as zonas que não apresentem uma alteração de cor, estarão carbonatadas.

Segundo (Faria, 2004), a solução alcoólica de fenolftaleína muda de cor no intervalo entre 8 e 10 de pH. Isto permite afirmar que uma solução se encontra carbonatada quando está

num meio neutro ou ácido e ainda em processo de carbonatação quando está em meio alcalino.

A figura 15 resume dois exemplos de carbonatação, um praticamente sem área carbonatada, outro apresenta cerca de metade carbonatado.



Figura 15 - Dois exemplos de carbonatação, o primeiro apresenta valores de carbonatação muito menores, enquanto o segundo está aproximadamente metade carbonatado, sendo que cada um representa uma formulação diferente

Após esta verificação, com o auxílio de uma craveira, mediu-se a carbonatação de cada provete, fazendo-se a média posteriormente, calculando-se a área não carbonatada de cada provete.

A fórmula utilizada para o cálculo da área não carbonatada é a seguinte:

$$Anc = \frac{(a-eca) \times (b-ecb)}{(a \times b)} \times 100 \text{ [%]} \quad (5)$$

em que,

Anc – área não carbonatada (%);

a – comprimento do provete (mm);

b – largura do provete (mm);

eca – espessura de carbonatação do comprimento do provete (mm);

ecb – espessura de carbonatação da largura do provete (mm).

### 2.8.7 Determinação da absorção de água por capilaridade

Este ensaio tem como objetivo determinar a absorção de água por capilaridade da argamassa endurecida. Recorreu-se à norma europeia EN 1015-18 (CEN,2002), sendo usadas metades dos provetes prismáticos utilizados do ensaio da resistência mecânica à tração por flexão, visto serem as que apresentam menos danos.

Através da figura 16, observa-se imagens representativas do ensaio de absorção de água por capilaridade.



Figura 16 - Imagem exemplificativa dos ensaios de absorção de água por capilaridade

Inicialmente, começou por se fazer a pesagem dos provetes no estado seco, sabendo assim a sua massa inicial.

Posteriormente, colocou-se esfregões verdes na base do recipiente e uma lâmina de água que tivesse entre 5 a 10 mm de altura. No decorrer do ensaio ocorre absorção de água pelos provetes, existindo a necessidade de repor água, tentando mantendo a altura constante.

Coloca-se um dos topos do provete sobre o esfregão, fazendo com que absorva a água ao longo do tempo.

O objetivo deste ensaio é que meia metade do provete ensaiado esteja totalmente saturada no final do ensaio, obtendo-se no final o coeficiente de capilaridade.

A quantidade de água absorvida por cada provete ( $\Delta m$  acumulado), por unidade de superfície e ao fim do tempo ( $t_x$ ), é dada por:

$$\Delta m \text{ acumulado} = \frac{m_x - m_0}{A} [\text{Kg/m}^2] \quad (6)$$

sendo,

$\Delta m$  acumulado – quantidade de água absorvida por capilaridade ao fim do tempo  $t_x$  ( $\text{Kg/m}^2$ );

$m_x$  – massa do provete ao fim do tempo  $t_x$  ( $\text{Kg}$ );

$m_0$  – massa inicial do provete, em estado seco ( $\text{Kg}$ );

$A$  – área de contacto da face do provete com a água ( $0,04 \times 0,04 \text{ (m}^2\text{)}$ ).

Depois de obtidos os valores da quantidade de água absorvida, procede-se à realização de um gráfico que relaciona a quantidade de água absorvida em função do tempo.



### **3. Apresentação e discussão de resultados**

#### **3.1 Considerações gerais**

Os grouts utilizados foram o grout da LEDAN TB1 (L) e o grout desenvolvido pela empresa DDL (DDL Argamassas), dois grouts comercializados e, o outro grout foi desenvolvido laboratorialmente, tendo sido dividido em duas formulações diferentes, para traço 1:1 e traço 1:2, ambos de cal aérea. (CL 11 e CL 12, respectivamente)

O grout desenvolvido pela empresa DDL Argamassas é também um grout de cal aérea, no entanto foi desenvolvido para outra finalidade, apresentando resistências mecânicas elevadas para a restituição da aderência em revestimentos. O objetivo passou então por testá-lo e adaptá-lo, tentando enquadrá-lo dentro dos requisitos necessários.

O rácio água/ligante é um parâmetro importante nos grouts de injeção. O grout L já tem um rácio estipulado, enquanto as restantes formulações não. Houve então a necessidade de testar os grouts com rácios diferentes até chegar-se a um valor de referência de trabalhabilidade.

#### **3.2 Formulações**

Foram estudadas 4 formulações, tanto para estado endurecido como para estado fresco, avaliando-se todas as propriedades.

Exceção do grout L, todas as restantes foram testadas e alteradas, variando a percentagem de água e fluidificante, diferentes traços e variando o ligante (fez-se uma substituição parcial da cal aérea por cal hidráulica, verificando o seu comportamento ao nível da resistência mecânica).

Assim apresenta-se as formulações com o auxílio das tabelas 5 à 9.

Tabela 5 - Diferentes formulações de grouts DDL

Grout	Materiais
DDL antigo (1)	Lafarge NHL 3,5 (19,08%), Areia de sílica SS160 (70,67%), Rheomix 934 da BASF (4,49%), Watertight Concrete Powder da Sika (4,26%), Walocel ME 1000R da Wekcelo (1,5%), Água (65%)
DDL (2)	Formulação seca, Água (65%), Glenium (3%)
DDL (3)	Formulação seca, Água (70%), Glenium (3%)
DDL (4)	Formulação seca, Água (75%), Glenium (3%)
DDL (5)	Formulação seca, Água (70%), Glenium (3,5%)
DDL (6)	Formulação seca, Água (70%), Glenium (4%)
DDL (7)	Formulação seca, Água (80%), Glenium (4%)



Tabela 6 - Diferentes formulações de grouts de cal aérea, para traço 1:1 e traço 1:2

Grout	Materiais
Cal aérea com 3% de Rheomix e 50% de água (CL 11 A)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (50%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (3%)
Cal aérea com 3% de Rheomix e 60% de água (CL 11 B)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (60%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (3%)
Cal aérea com 4% de Rheomix e 70% de água (CL 11 C)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (70%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (4%)
Cal aérea com 4% de Glenium e 50% de água (CL 11 D)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (50%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Glenium (4%)
Cal aérea com 4% de Glenium e 60% de água (CL 11 E)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (60%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Glenium (4%)
Cal aérea com 5% de Glenium e 60% de água (CL 11 F)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (60%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Glenium (5%)
Cal aérea com 4,5% de Glenium e 65% de água (CL 11 G)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (65%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Glenium (4,5%)

Tabela 7 - Diferentes formulações de grouts com substituição parcial da cal aérea por cal hidráulica, para um traço de 1:1:2

Grout cal aérea e cal hidráulica para um traço 1:1:2 com 3% de Rheomix e 50% de água (CL + NHL 112 A)	Cal aérea Lusical, cal hidráulica Lafarge, areia de sílica SS160, Água (50%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (3%)
Grout cal aérea e cal hidráulica para um traço 1:1:2 com 3% de Rheomix e 60% de água (CL + NHL 112 B)	Cal aérea Lusical, cal hidráulica Lafarge, areia de sílica SS160, Água (60%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (3%)
Grout cal aérea e cal hidráulica para um traço 1:1:2 com 4% de Rheomix e 70% de água (CL + NHL 112 C)	Cal aérea Lusical, cal hidráulica Lafarge, areia de sílica SS160, Água (70%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (4%)

Tabela 8 - Formulação do grout de cal aérea, para um traço 1:3

Grout	Materiais
Grout cal aérea com 3% Rheomix e 50% água (CL 13)	Cal aérea Lusical, areia de sílica SS160, Água (50%), Argical 1200 (10%), Walocel (0,4%) e Rheomix 934 da BASF (3%)

Tabela 9 - Formulação do grout LEDAN TB1

Grout	Materiais
LEDAN TB1	Formulação seca, Água (79%)

### 3.2.1 Nomenclaturas dadas

A tabela 10 resume as nomenclaturas dadas a cada formulação existente.

Tabela 10 - Nomenclaturas dadas para cada formulação

Grout	Nomenclatura
DDL	DDL1 - DDL7
LEDAN	L1 - L3
Cal aérea traço 1:1	CL11A - CL11G
Cal aérea traço 1:2	CL12A - CL12G
Cal aérea traço 1:3	CL 13
Cal aérea + Cal hidráulica traço 1:2	CL+NHL 112 A - CL+NHL 112 C

## 3.2 Propriedades dos grouts no estado fresco

### 3.2.1 Expansão e exsudação

Como mencionado em 2.7.1, a realização deste ensaio permite que se possa concluir da existência ou não de separação de água (exsudação) e/ou acontecimento de expansão, isto é, a verificação de uma alteração do volume inicial.

Os ensaios realizados para as respectivas formulações apresentaram bons indícios, não se verificando existência de expansão nem exsudação. Embora não se tenha registado qualquer alteração do volume inicial de grout vertido, existe um erro associado de  $\pm 0,05$  ml, pois provavelmente essa separação de água até ocorreu, mas por ser um valor tão pequeno não foi possível visualizar a olho nu.

Todas as formulações foram testadas e nenhuma apresentou alteração do volume final ou separação de água, mas certas formulações apresentaram retrações. Não sendo este o ensaio referente ao estudo específico da presença de fissurações, conclui-se que as amostras que apresentaram fissurações neste ensaio, provavelmente iriam apresentar fissurações no ensaio da retração.

Não serão apresentados os resultados de todas as formulações pois estes são bastante semelhantes, mas apresentam-se alguns dos ensaios mais importantes de forma a retirar conclusões.

A tabela 11 resume os valores do ensaio para as formulações DDL 3, L, DDL 1, CL 13, CL + NHL 112 A, CL 11 A, CL 12 A, CL 11 G e CL 12G, respetivamente.

Salienta-se que CL 11 G, CL 12 G e DDL 3, são as formulações que irão ser testadas para todos os ensaios.

Tabela 11 - Valores de expansão e exsudação referente às formulações DDL 3, DDL 1, CL 13, CL + NHL 112 A, CL 11 A, CL 12 A, CL 11 G, CL 12 G

Expansão e exsudação	DDL 3						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	385	385	385	385	385	385	385
Expansão e exsudação	L						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	390,5	390,5	390,5	390,5	390,5	390,5	390,5
Expansão e exsudação	DDL 1						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	400	400	400	400	400	400	400
Expansão e exsudação	CL 13						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	330	330	330	330	330	330	330
Expansão e exsudação	CL + NHL 112 A						
Intervalo de tempo (min)		15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	355	355	355	355	355	355	355
Expansão e exsudação	CL 11 A						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	420	420	420	420	420	420	420
Expansão e exsudação	CL 12 A						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	380	380	380	380	380	380	380
Expansão e exsudação	CL 11 G						
Intervalo de tempo (min)		15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	410	410	410	410	410	410	410
Expansão e exsudação	CL 12 G						
Intervalo de tempo (min)	0	15	30	45	60	120	180
Volume (ml)	390	390	390	390	390	390	390

Pode-se referir que os valores retirados dos ensaios foram sempre constantes, não apresentando nenhuma alteração a nível de volume bem como não se notou qualquer separação de água do grout. No entanto, é necessário referir que este ensaio é propício à existência de erros.

Optou-se por prosseguir com as formulações DDL3, CL 11G e CL12G, pois apresentaram melhores resultados em termos de expansão e exsudação, sem presença de fissurações durante o seu endurecimento.

### 3.2.2 Retração

Como se referiu em 2.7.2, este ensaio permite a observação da criação ou não de fissuras e, em casos muito específicos, a existência de bolhas de ar na superfície. Caso se verifique a existência de fissuras, é necessário descrever como estas se apresentam, pois caso estas se situem superficialmente no meio do grout consolidado, não terão tanto impacto como fissuras na fronteira de aderência, entre o grout e a caixa de Petri.

A retração é um parâmetro que está diretamente ligado à quantidade de água que se adiciona, assim pode-se concluir que quanto mais água, maior a probabilidade de fissurar, pois a água evapora, fazendo com que o grout retraia mais.

O grout DDL 3 apresentou pequenas retrações, na superfície. É um aspeto negativo, no entanto, teria um impacto maior caso estas ocorressem na zona de aderência entre o grout e o suporte. Houve a criação de uma película brilhante superficialmente que pode ser um obstáculo para a aderência.

O grout CL 11 G não apresentou retrações superficiais mas ocorreu perda de aderência, embora não na zona onde esta é mais desfavorável, ou seja, na interface entre suporte/grout. No entanto pode fazer com que haja um comprometimento da estabilidade do grout em obra. Verificou-se também a criação de uma película superficial, não tão acentuada como no grout DDL.

O grout CL 12 G não apresentou retrações, quer superficialmente quer na zona de aderência, em nenhuma etapa da sua consolidação. Aliás, este grout mostrou ser bastante compacto em comparação com o grout CL 11 G. Não se esperava que um grout de cal aérea apresentasse uma resistência tão grande, visto a cal aérea ser um material fraco ao nível de resistências mecânicas.

O grout CL + NHL 112 A acabou por apresentar uma compactação excessiva, sem qualquer indício de fissuração. Apenas com 2 dias de presa foi praticamente impossível retirar o grout da caixa de Petri. Considerou-se que não iria cumprir com a questão da compatibilidade das características em relação ao suporte dos revestimentos.

O grout L não apresentou qualquer tipo de fissuração e apresentou uma consolidação interessante, sem ser excessiva.

O facto de se usar uma caixa de Petri neste tipo de ensaio poderá ser um aspeto negativo, visto ser um espaço muito confinado e pequeno.

### 3.2.3 Teste do cone de fluidez

O valor de fluidez pretendido está compreendido entre os 30 e 60 segundos, tendo em conta que o objetivo passa pela reabilitação de revestimentos.

Na tabela 12 podem-se observar os valores de fluidez obtidos para as formulações DDL 3, CL 11 G, CL 12 G e L.

Tabela 12 - Valor do tempo de fluidez para os grouts L, DDL 3, CL 11 G e CL 12 G

Grout	Tempo de fluidez (s)
L	26
DDL 3	38
CL 11 G	45
CL 12 G	54

Conclui-se que o grout que mais se aproxima do valor de L é o DDL 3. Contudo, todos eles estão inseridos no intervalo de tempo definido, concluindo-se que estas 4 formulações correspondem ao objetivo pretendido.

### 3.2.4 Injetabilidade

O termo refugo significa o material que sobra, ou seja, será a quantidade que se pretende injetar, 50 ml, subtraindo a quantidade injetada, em ml.

Os valores referentes ao ensaio de injetabilidade dos grouts DDL 3, L, CL 11 G e CL 12 G apresentam-se na tabela 13.

Provete	Altura da coluna afetada (ml)	Tempo de 50 ml injetados (s)	Tempo total de injeção (s)	Quantidade injetada (ml)	Refugo (ml)
DDL 3	117	-	172	22	38
L	225	127	270	50	-
CL 11 G	130	-	239	30	20
CL 12 G	100	-	210	20	30

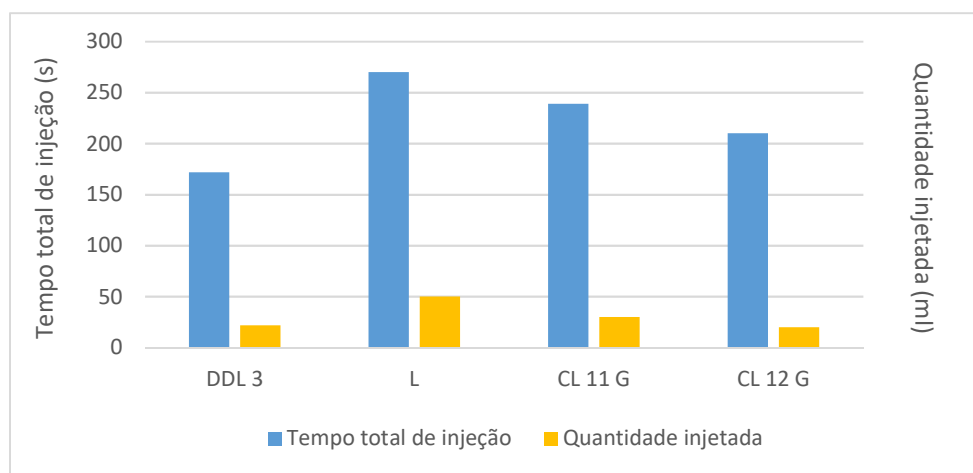


Figura 17- Gráfico para análise do tempo total de injeção vs quantidade injetada para cada grout

Pela análise da figura 17 pode-se verificar que a quantidade do grout L foi totalmente injetada. Por outro lado, não foi possível injetar os 50 ml do grout DDL 3, CL 11 G e CL 12 G pretendidos. O grout CL 11 G apresentou melhores resultados, comparativamente aos grouts CL 12 G e DDL 3. Embora tenha demorado cerca de 239 segundos, foi o que apresentou valores mais aproximados ao grout L.

Pelo contrário, o grout CL 12 G apresentou piores resultados em termos de injetabilidade. Estes valores de injetabilidade devem-se ao facto deste grout apresentar maiores valores de compactação, resistências mecânicas e um menor valor de fluidez. Ou seja, como perde trabalhabilidade, ganha presa mais facilmente, sendo menor a quantidade que será injetada.

### 3.3 Propriedades dos grouts no estado endurecido

#### 3.3.1 Ensaio Módulo de elasticidade dinâmico (Ed)

A tabela 14 mostra os valores dos módulos de elasticidade dinâmicos de amostra.

Tabela 13- Valores do módulo de elasticidade dinâmico, Ed, de cada provete realizado

Grout	Módulo de elasticidade (MPa)	Médias (MPa)
DDL 3.1	4490,3	4387,5
DDL 3.2	4385,8	
DDL 3.3	4286,4	
L.1	702,6	782,5
L.2	827,1	
L.3	817,8	
CL 11.1 G	1251,2	1270,8
CL 11.2 G	1451,2	
CL 11.3 G	1110,0	
CL 12.1 G	1719,3	1704,5
CL 12.2 G	1655,0	
CL 12.3 G	1739,0	

A figura 18 representa os valores médios do módulo de elasticidade dos provetes (Ed) aos 28 dias.



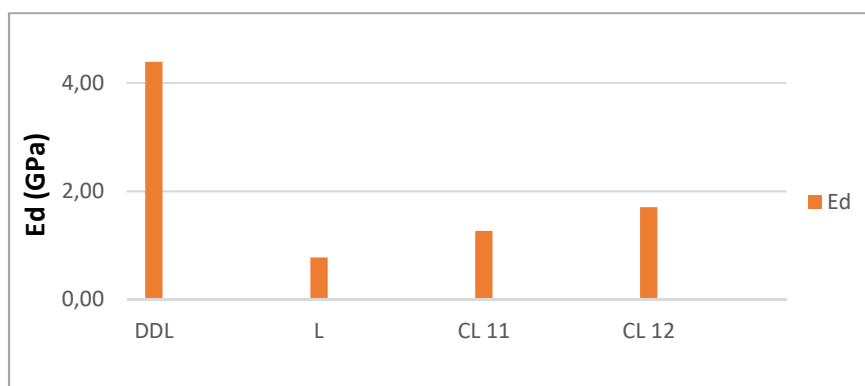


Figura 18 - Média dos módulos de elasticidade dos provetes dos grouts de injeção, após cura de 28 dias

O grout DDL 3 apresenta valores de módulo de elasticidade elevados, aproximadamente 4,9 GPa. O valor deve ser o mais próximo possível do suporte e, em ações de reabilitação de revestimentos são, geralmente, inferiores ao obtido. Conclui-se que este valor é exagerado, no entanto, é mais fácil diminuir a compacidade de um grout do que aumentá-la.

A gama de valores que se espera para grouts de injeção de cal aérea está compreendida entre os 0,5 e 2 GPa.

O grout L apresentou um módulo de elasticidade de 0,8 GPa, seguido do grout CL 11 G e posteriormente do CL 12 G.

Tanto o grout CL 11 G como o CL 12 G encontram-se dentro da gama de valores pretendida. Maior módulo de elasticidade significa menor porosidade, logo mais compacto é o material, a tensão necessária para se dar a deformação é maior.

O grout que mais se aproxima dos valores apresentados por L é o grout CL11 G, sendo o grout mais satisfatório em termos de módulo de elasticidade.

### 3.3.2 Resistência à tração por flexão (Rt)

A tabela 15 mostra os valores medidos referentes à tração por flexão.

Tabela 14 - Valores da resistência à tração por flexão de cada provete

Grout	Rt (MPa)	Média de Rt (MPa)
DDL 3.1	1,02	1,04
DDL 3.2	0,87	
DDL 3.3	1,24	
L.1	0,34	0,32
L.2	0,33	
L.3	0,28	
CL 11.1 G	1,06	0,69
CL 11.2 G	0,26	
CL 11.3 G	0,76	
CL 12.1 G	0,71	0,68
CL 12.2 G	0,77	
CL 12.3 G	0,57	

A figura 19 representa os valores médios de resistência à tração por flexão, de cada grout.

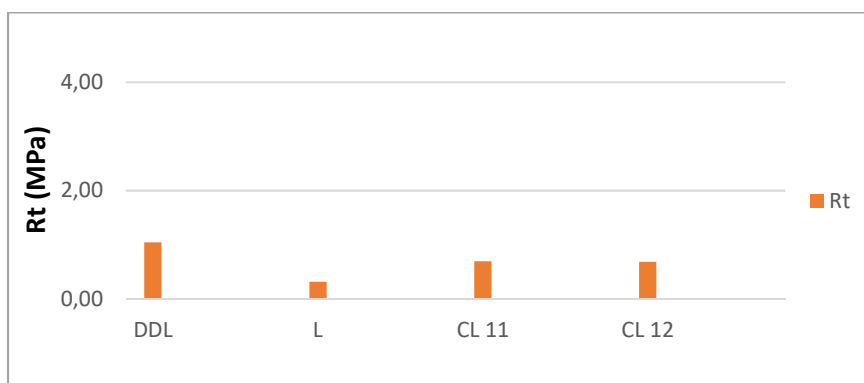


Figura 19 - Média dos valores de resistência à tração por flexão de cada formulação

O valor mais alto de resistência à tração por flexão é do grout DDL. Este foi o grout que apresentou maiores valores de módulo de elasticidade,  $E_d$ , logo é o grout mais compacto, consequentemente o grout que mais suporta tensões de tração.

Esperava-se que o grout CL 12 G apresentasse valores um pouco maiores que o CL 11 G, visto ter um maior módulo de elasticidade, mas de facto não aconteceu. É necessário

salientar que o grout CL11 G apresentou um valor de 0,26, fazendo com que o valor médio fosse inferior.

É importante referir que os provetes, CL11 G e CL12 G apresentaram uma superfície rugosa, algo incomum neste tipo de material e pode ter afetado os valores correspondentes. Além disso, este tipo de superfície não é aconselhável, pois pode corresponder a uma possível não aderência ao suporte.

Os grouts CL 11 G e CL12 G foram os que apresentaram resultados mais próximos ao do grout L, levando assim à sua escolha.

### 3.3.3 Resistência à compressão (Rc)

A tabela 16 mostra os valores obtidos para a resistência à compressão.

Tabela 15 - Valores da resistência à compressão de cada provete

Grout	Rc (MPa)	Média de Rc (MPa)
DDL 1	11,30	11,56
DDL 2	12,32	
DDL 3	11,06	
L 1	1,41	1,43
L 2	1,36	
L 3	1,51	
CL 11.1	1,83	1,90
CL 11.2	1,90	
CL 11.3	1,97	
CL 12.1	1,36	1,34
CL 12.2	1,46	
CL 12.3	1,20	

A figura 20 representa os valores médios de resistência à compressão, de cada grout.

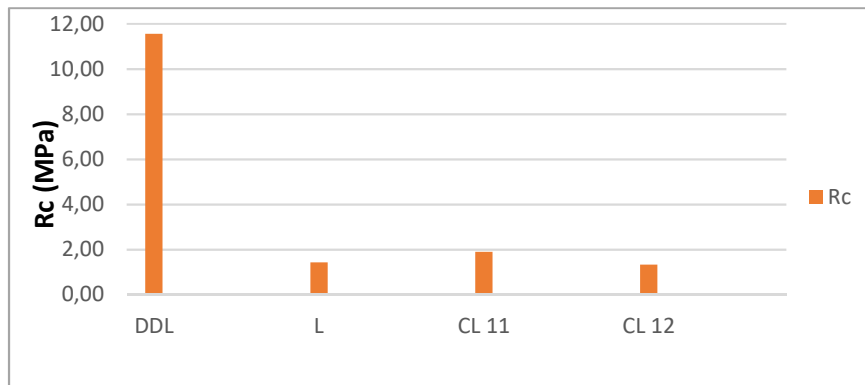


Figura 20 - Média dos valores de resistência à compressão de cada formulação

Em termos de resistência à compressão, o valor limite que se pretende é na ordem dos 2 MPa.

Tendo em conta este limite, considerou-se que o grout da DDL apresentou um valor elevado, ou seja, este não cumpria os requisitos da compatibilidade das características com o suporte. Aliás, com valores tão elevados era muito provável que pudesse levar ao colapso do suporte.

Os grouts CL 11 G e CL 12 G apresentam valores mais próximos do valor de L, estando ambos compreendidos dentro do intervalo estipulado, recaindo a escolha nestes.

#### 3.3.4 Área não carbonatada

A tabela 17 mostra os valores da área não carbonatada nas amostras.

Tabela 16 - Valores da área não carbonatada de cada provete prismático e média para cada formulação

Grout	Área não carbonatada (%)	Média (%)
DDL 3.1	90,06	91,92
DDL 3.2	93,17	
DDL 3.3	92,54	
L.1	40,64	40,98
L.2	43,51	
L.3	38,78	
CL 11.1 G	73,46	73,14
CL 11.2 G	72,85	
CL 11.3 G	73,12	
CL 12.1 G	62,71	64,82
CL 12.2 G	65,55	
CL 12.3 G	66,20	

A figura 21 resume a variação da área não carbonatada entre os diferentes grouts.

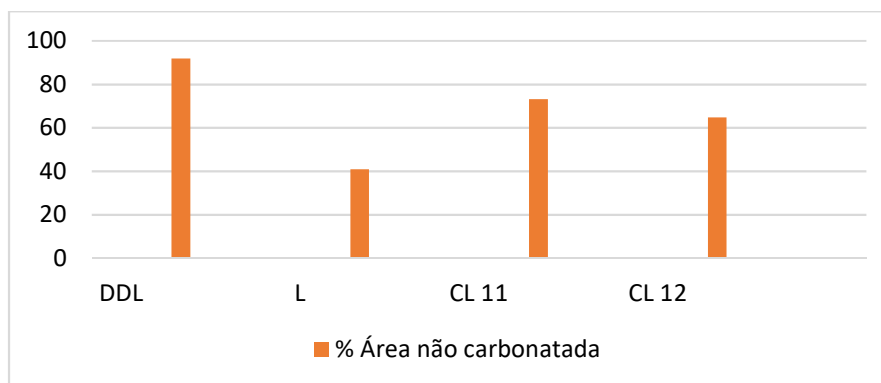


Figura 21 – Média dos valores da % de área não carbonatada de cada grout

A cal aérea apenas atinge a carbonatação máxima ao final de 180 dias, podendo ser mais demorada.

Esta variedade de valores está relacionada com a estrutura porosa, com a humidade da pasta e temperatura.

Quanto maior porosidade, menor % de área não carbonatada. Anteriormente, no ensaio do módulo de elasticidade, concluiu-se que quanto maior o módulo de elasticidade, menos poroso é o material e a maior a sua compacidade. Fazendo uma relação entre estes parâmetros todos, pode-se dizer que quanto menor a porosidade, maior o valor da área

não carbonatada. Ou seja, se um material é bastante compacto, então não permite, tão facilmente, a entrada de  $\text{CO}_2$ , responsável por promover a reação de carbonatação.

Nos extremos, temos o grout L e o grout DDL 3 e facilmente se explica a diferença de valores. Enquanto que o grout DDL 3 é um grout pouco poroso, o grout L é bastante poroso, daí o grout DDL 3 estar praticamente por carbonatar enquanto que o grout L já carbonatou mais de metade.

Quanto aos grouts CL 11 G e CL 12 G, tanto no módulo de elasticidade como neste ensaio, ficaram sempre entre os grouts DDL 3 e L. Apresentaram maior porosidade que DDL 3 e maior que L.

Mais uma vez os grouts que mais se aproximaram do valor do grout L foram o grout CL 11 G e CL 12 G

Por vezes, ao usar-se a solução de fenolftaleína como indicador de pH, este indica que a carbonatação já está concluída, no entanto nem sempre é verdade, pois a partir de certo momento este indicador deixa de ter a sensibilidade para analisar o pH. O que se pode afirmar é que quando se atingir a carbonatação final, então as resistências mecânicas passarão a ser aproximadamente constantes. (Agostinho, 2008)

### 3.3.5 Absorção de água por capilaridade

Apresentam-se de seguida os gráficos referentes à evolução da absorção de água das diferentes amostras, pelas figuras 22-32.

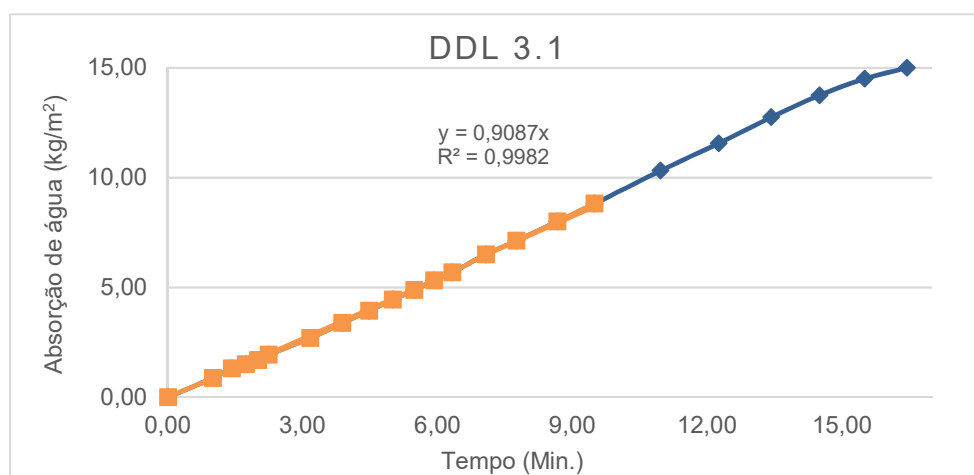


Figura 22 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra DDL 3.1

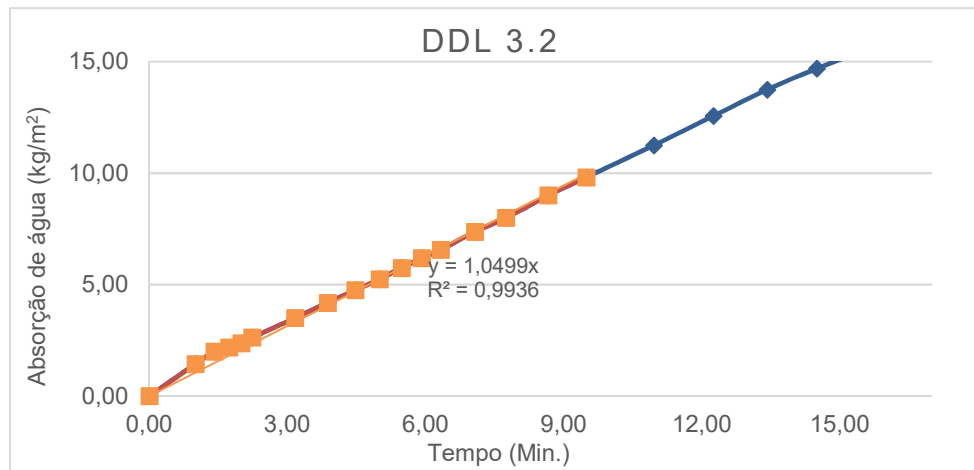


Figura 23 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra DDL 3.2

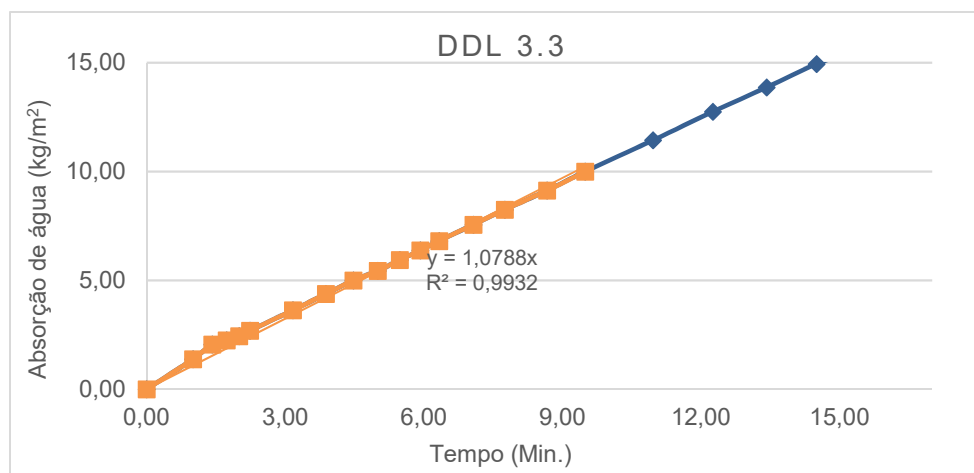


Figura 24 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra DDL 3.3

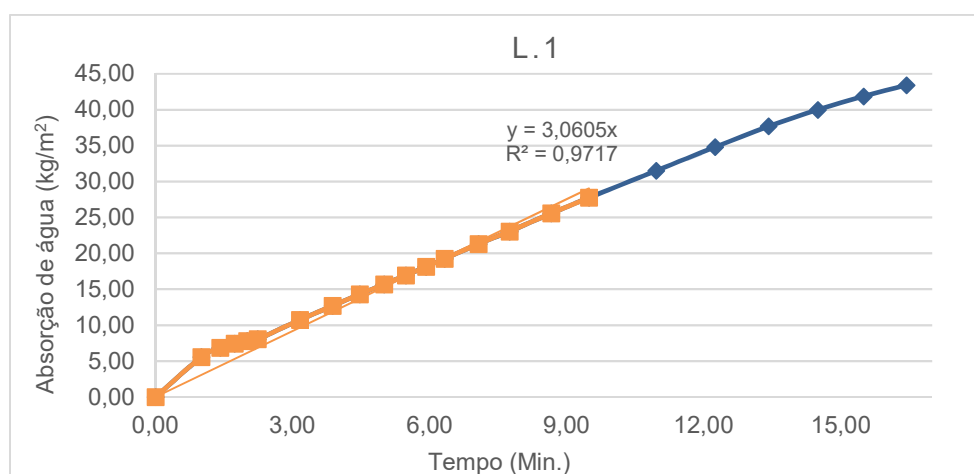


Figura 25 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra L.1

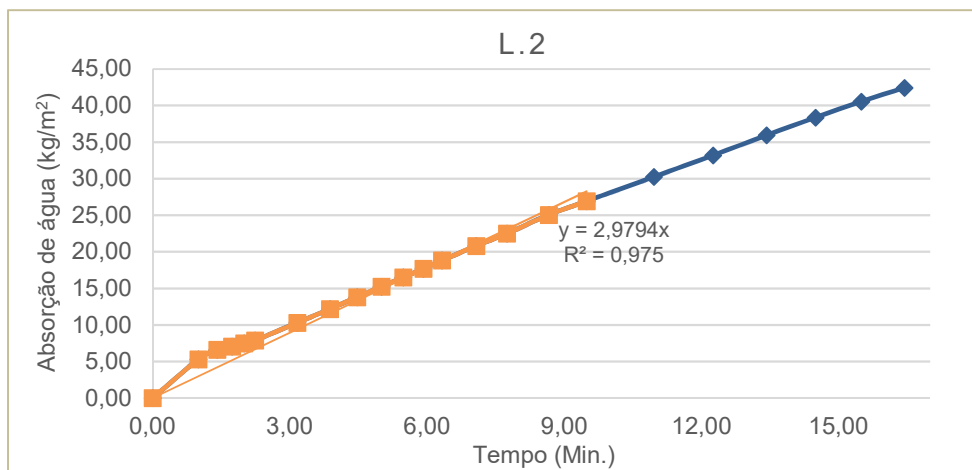


Figura 26 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra L.2

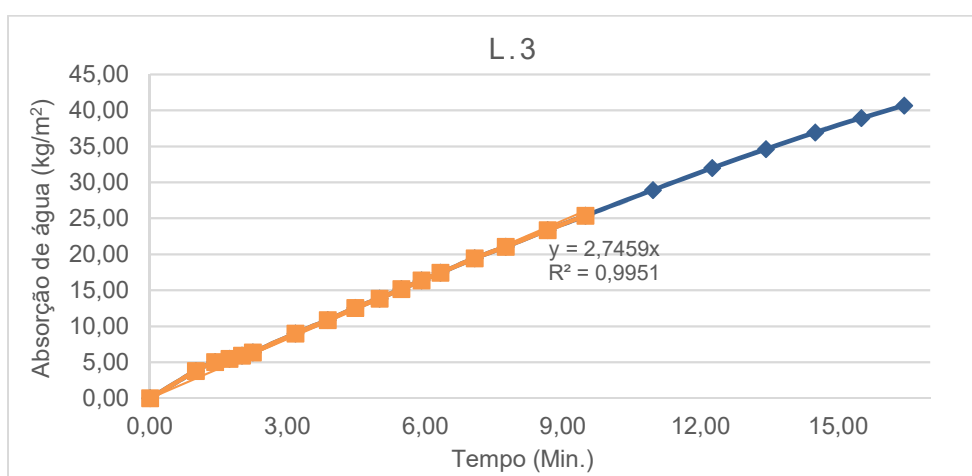


Figura 27 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra L.3

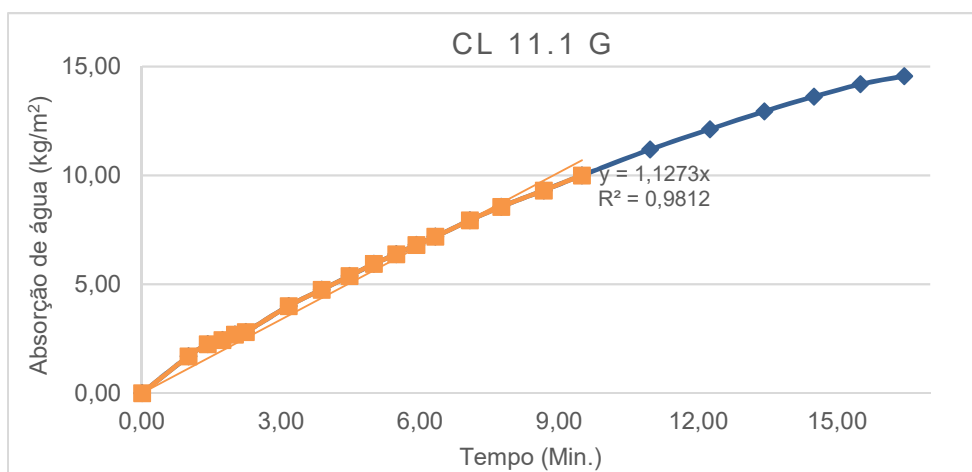


Figura 28 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 11.1 G



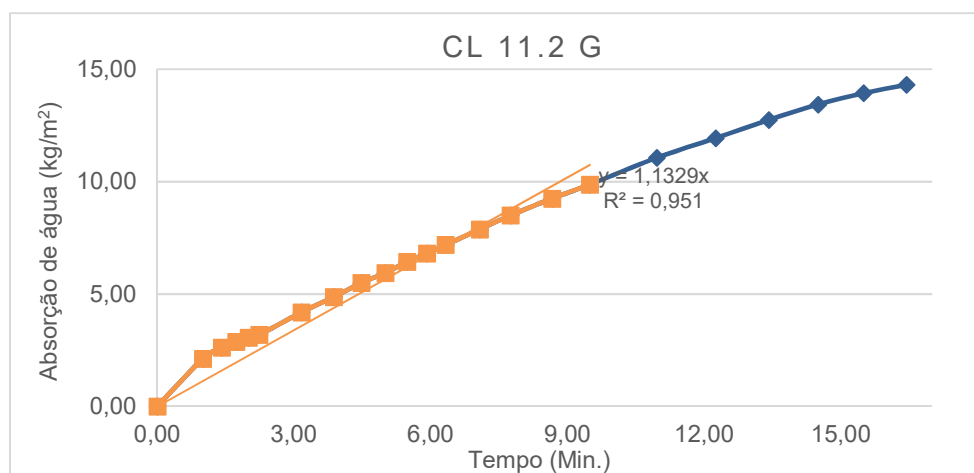


Figura 29 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 11.2 G

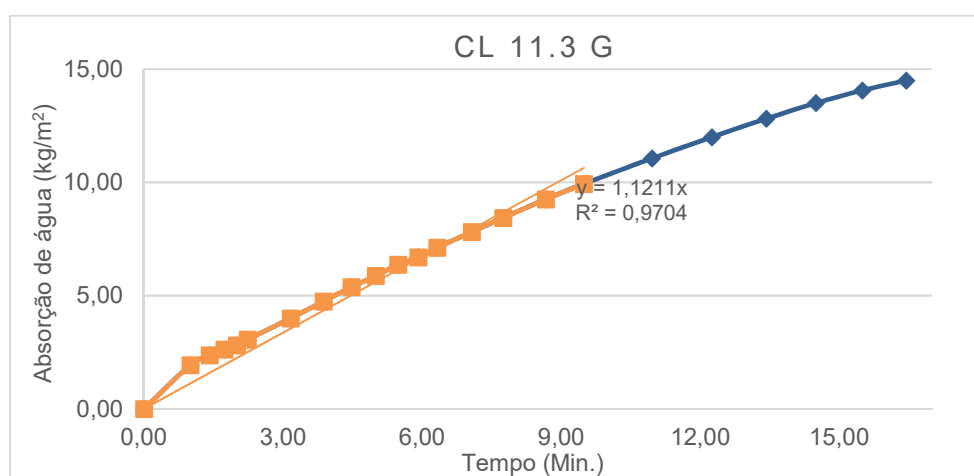


Figura 30 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 11.3 G

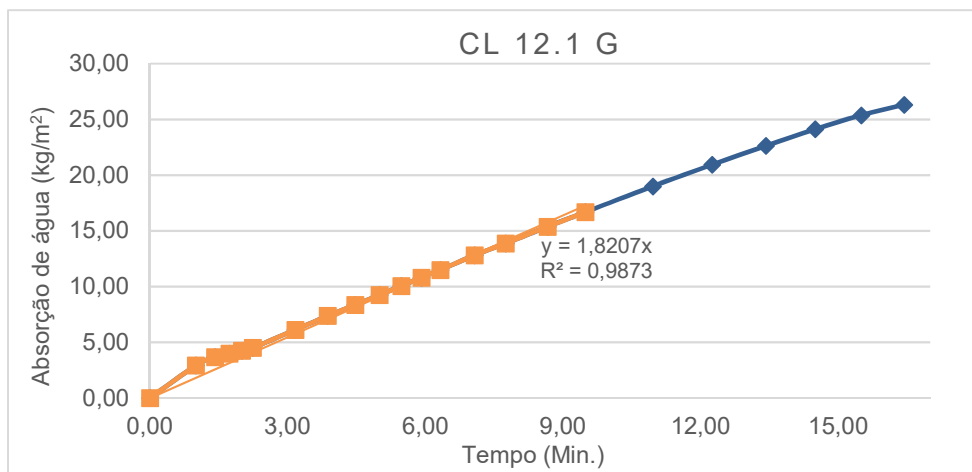


Figura 31 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 12.1 G

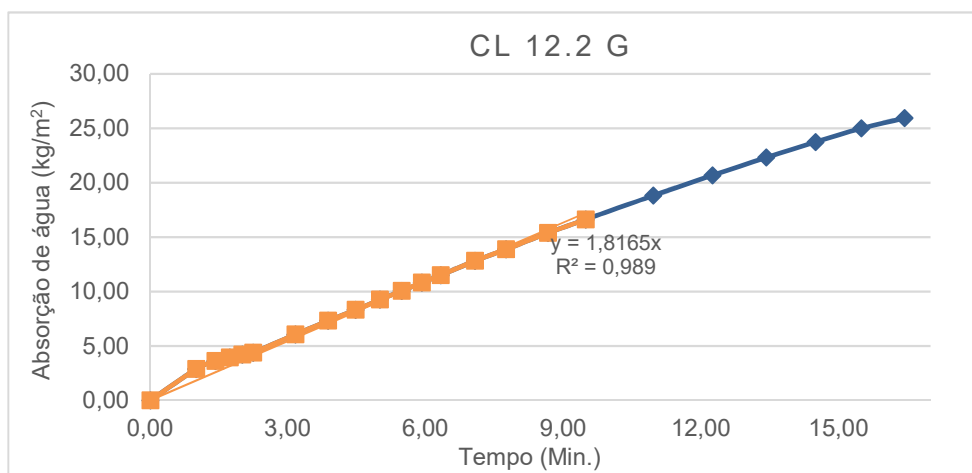


Figura 32 - Evolução da absorção de água com o tempo da amostra CL 12.2 G

A tabela 18 mostra os valores estimados do coeficiente de capilaridade (CC) de cada amostra. A figura 33 representa os valores médios de cada grout, para melhor compreensão.

Tabela 17 - Valores do coeficiente de capilaridade para cada provete bem como as médias de cada formulação

Grout	Coeficiente de capilaridade (Kg/m <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup> )	Média (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>1/2</sup> )
DDL 3.1	0,91	1,01
DDL 3.2	1,05	
DDL 3.3	1,08	
L.1	3,06	2,93
L.2	2,98	
L.3	2,75	
CL 11.1 G	1,13	1,13
CL 11.2 G	1,13	
CL 11.3 G	1,12	
CL 12.1 G	1,82	1,82
CL 12.2 G	1,82	
CL 12.3 G	-	

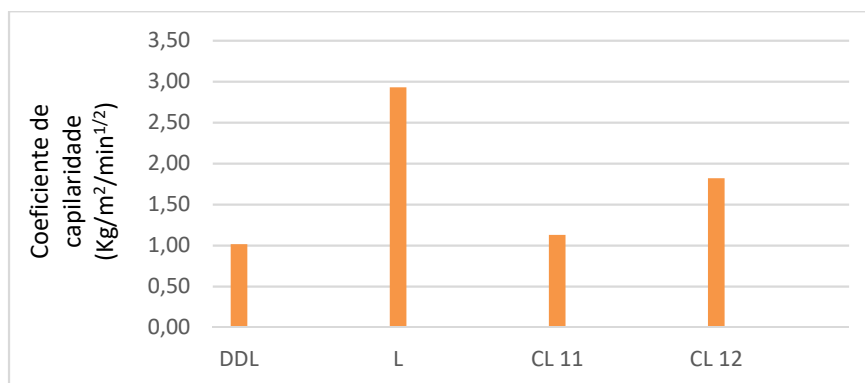


Figura 33 - Coeficiente de capilaridade de cada formulação

Apresenta-se apenas dois valores referentes ao grout CL 12 G visto uma amostra ter apresentado um grau de dano considerável e não permitir o seu ensaio.

O grout L apresentou um maior coeficiente de capilaridade, podendo afirmar-se que é o grout que tem um maior poder de absorção. O grout que mais se aproxima, no entanto com um valor ainda baixo é o CL12 G. As amostras de CL11 G e DDL 3 apresentam valores muito baixos de coeficiente de capilaridade, o que significa que a sua capacidade de absorver água é baixa.

Pode-se concluir que quanto mais poroso é o grout, maior a sua capacidade de absorção de água, ou seja, maior o coeficiente de capilaridade. Os grouts que apresentaram maior porosidade foram L e CL 12 G que, por sua vez, apresentaram maior coeficiente de capilaridade. Ao contrário encontram-se as amostras CL 11 G e DDL 3, sendo a que mostra menor coeficiente de capilaridade a DDL 3.

### 3.3.6 Aderência ao suporte

Este ensaio permite retirar conclusões importantes, tais como o tipo de rutura e possível aderência do grout de injeção ao suporte, ou não, e, retirar o valor de tensão de aderência máxima a partir da força aplicada por tração direta perpendicular à superfície da argamassa, fazendo-se o arrancamento do grout.

É um ensaio complexo em termos de resultados, visto a mesma amostra de grout injetado em argamassas idênticas apresentar valores díspares.

A tabela 19 apresenta os valores da tensão máxima de aderência dos provetes, bem como as médias para cada formulação

A figura 34 mostra os valores médios de cada formulação.

Tabela 18 - Valores da tensão máxima de aderência e seus valores médios para cada formulação

Grout	Tensão máxima de aderência (MPa)	Grout	Média (MPa)
DDL 1	0,022	DDL	0,012
DDL 2	0,011		
DDL 3	0,003		
CL11.1	0,049	CL11	0,023
CL11.2	0,005		
CL11.3	0,015		
CL12.1	0,013	CL12	0,028
CL12.2	0,050		
CL12.3	0,021		

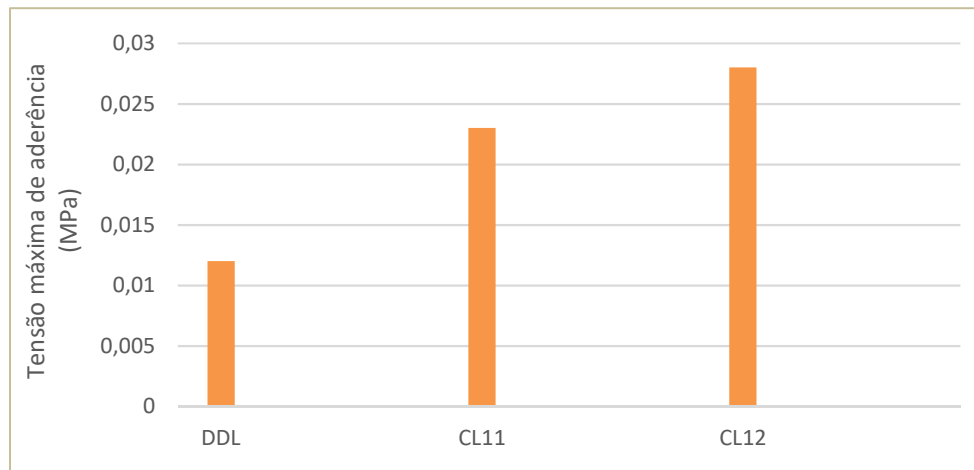


Figura 34 - Média dos valores de tensão de aderência máxima de cada formulação

A figura 35, 36 e 37 mostra o tipo de rotura existente em cada amostra de grout.



Figura 35 - Tipos de rotura observados nos provetes: 1ª- Rotura coesiva no suporte e adesiva DDL 3.1; 2ª- Rotura coesiva no suporte e mista DDL 3.2; 3ª- Rotura coesiva no suporte e mista DDL 3.3

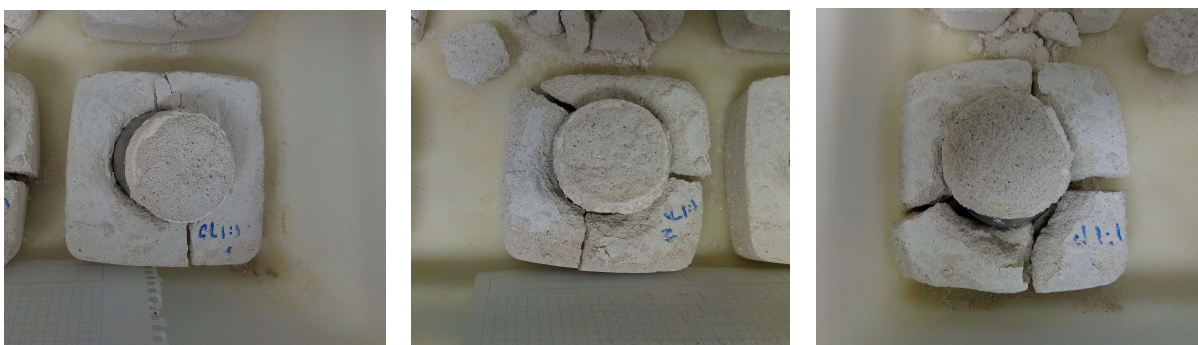


Figura 36 - Tipos de rotura observados nos provetes: 1ª- Rotura coesiva no suporte CL11.1 G; 2ª- Rotura coesiva no suporte CL11.2 G; 3ª- Rotura coesiva no suporte CL11.3 G

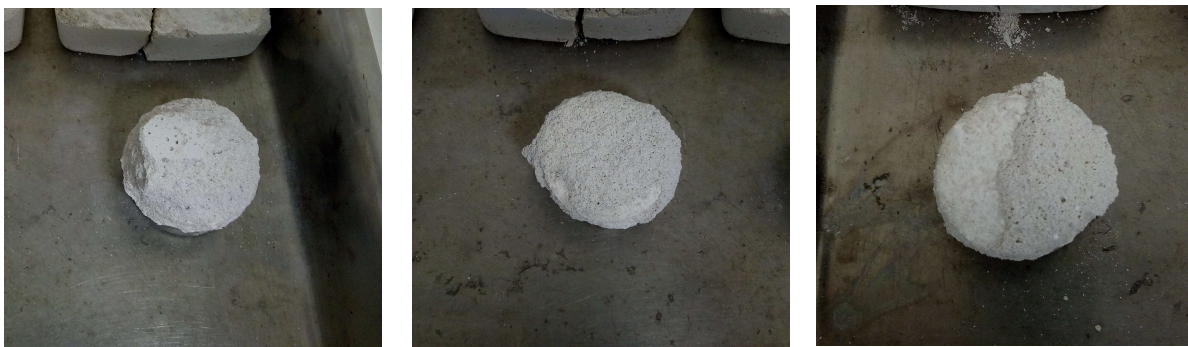


Figura 37 - Tipos de rotura observados nos provetes: 1ª- Rotura coesiva no suporte CL12.1 G; 2ª- Rotura coesiva no suporte CL12.2 G; 3ª- Rotura coesiva no suporte e adesiva CL12.3 G

Os provetes experimentaram dois tipos de rotura, a coesiva no suporte e a adesiva. A rotura coesiva refere-se ao suporte, isto é, em termos de adesão do grout ao suporte não existiram quaisquer problemas pois a rotura ocorreu no interior do suporte. O problema maior ocorreu no suporte, não apresentando coesão suficiente quando comparado com o grout, dando-se a rotura e, assim, pode-se concluir que o suporte apresenta muito baixa coesão. Nos casos onde se deu este tipo de rotura pode-se afirmar que o adesivo, neste caso o grout de injeção teve uma boa adesão ao suporte. No entanto, apesar de uma boa aderência, quando ensaiado ao arrancamento por tração ocorreu a rotura pela zona do suporte, indicação de que o grout de injeção não é compatível com o suporte, apresentando resistências à tração superiores ao suporte.

Nos provetes dos grouts DDL 3 e CL12.3 G foram evidenciados sinais de rotura coesiva no suporte e adesiva, indicador de falta de aderência entre o suporte e o grout e ao mesmo tempo cedência do suporte. Este fenómeno pode estar ligado ao módulo de elasticidade. Sendo o módulo de elasticidade do grout muito superior ao do suporte, faz com que este suporte as tensões de compressão mais fortes, originando descolamentos localizados, daí a junção dos dois tipos de rotura.

Pela análise da figura 22, observa-se que o material que apresentou maiores tensões de cedência foi o grout CL12 G, por outro lado o que apresentou piores valores de tensão foi o grout DDL 3.

## 4. Conclusões

### 4.1 Conclusões

Os produtos desenvolvidos basearam-se em certos parâmetros específicos, tais como a fluidez, qualidade de injeção, retração, expansão, exsudação, propriedades no estado fresco, com o objetivo de se garantir um grout com uma injeção adequada. Apesar de ser mais fácil, teoricamente, melhorar apenas um destes parâmetros, quando se pretende um grout que preencha todos os requisitos, a alteração de apenas um parâmetro para se garantir melhores resultados, pode levar a que haja um decréscimo de qualidade na mistura final. No estado endurecido, os parâmetros que se procuraram atingir foram o módulo de elasticidade, resistências mecânicas, área não carbonatada, absorção de água por capilaridade e o parâmetro mais importante, a aderência ao suporte. É necessário salientar que, todos estes parâmetros, tanto em estado fresco como em estado endurecido, foram avaliados de forma a garantir a compatibilidade de materiais e de características entre o grout de injeção e o suporte. Para se garantir o melhor desempenho, estudaram-se certas características, tais como a quantidade de água e velocidade de mistura. Ou seja, uma maior percentagem de água adicionada à formulação seca, faz com que o grout possua uma maior fluidez, que por si só leva a uma melhor capacidade de injeção, maior trabalhabilidade. Contudo, o uso excessivo de água também pode ter repercussões graves, como o aumento excessivo de porosidade e diminuição das características mecânicas.

O uso exclusivo de cal aérea como ligante teve em conta a compatibilidade das características e dos materiais para reabilitação dos revestimentos e, normalmente, neste tipo de ações, o uso de cal aérea é obrigatório. Caso se usasse cal hidráulica como ligante, iria-se obter maiores resistências mecânicas que, em casos extremos, poderia levar à cedência do suporte.

Realizou-se uma formulação em que se procedeu à substituição parcial da cal aérea por cal hidráulica, por motivos de curiosidade, para verificação do tipo de resultados, no entanto a superfície do provete apresentou muitas rugosidades e optou-se por não continuar o estudo.

Outra alteração estudada foi o uso de fluidificante líquido ou sólido, com o intuito de se observar qual destes tem maior impacto nas características do grout. Após realização dos ensaios, optou-se pelo uso do fluidificante líquido, tendo este mostrado maior força de

ligação, em quantidades inferiores, comparativamente ao fluidificante em pó. Quanto maior poder fluidificante, melhor injetabilidade, menor segregação e ao mesmo tempo menor teor em água necessário, permitindo que hajam menores retrações e maiores resistências mecânicas. Quanto melhor for o fluidificante, melhor potencialidade de adesão ao suporte.

Os grouts que mostraram maior potencialidade de serem aplicados foram o CL 11 G e CL 12 G, sendo estes os que apresentaram valores mais próximos do grout L e também foram aqueles onde a rotura se deu pelo suporte, isto é, por fraca coesão da interface interior do suporte.

Um fator importante e fundamental, a que normalmente não se dá importância, é referente à preparação do grout em obra. A boa capacidade do grout pode ser comprometida em obra visto ser um fluido que precisa de uma certa consistência de mistura. Basta um mau procedimento ou um não seguimento das normas e a trabalhabilidade ou funcionalidade pode estar em risco. O grout começa a perder trabalhabilidade ao fim de 10, 15 minutos, começa a ganhar uma certa consistência e, nesse aspeto, pode estar sujeito à introdução de uma pressão maior, que pode levar ao colapso do suporte. A preparação em obra é fundamental para se garantir a máxima trabalhabilidade.

Em laboratório estes ensaios podem ser realizados com mais rigor, no entanto, nem sempre é fácil garantir resultados homogêneos para a mesma formulação.

## **4.2 Desenvolvimentos futuros**

Após o término da dissertação verificou-se que ficaram alguns aspetos por analisar. Seria interessante estudar:

- Determinação da massa volúmica aparente dos materiais;
- Caracterização dos grouts de injeção após 90 dias e 180 dias de cura;
- Realização de ensaios ao suporte in situ, de forma a garantir-se a melhor compatibilidade com o suporte;
- Realização da injeção dos grouts in situ, verificando o comportamento real que estes possuem quando aplicados em obra;
- Realização de ensaios de reologia nos grouts de injeção. A reologia acaba por ter uma influência acrescida na fluidez dos grouts de injeção então, seria interessante



realizar-se uma análise experimental onde se pudesse verificar as alterações passíveis de serem realizadas para melhorar os grouts;

- Verificar a viabilidade da injeção em obra, visto esta nem sempre ser realizada por pessoal com formação/especializado.



## Referências bibliográficas

- Abrantes, R. N. de C. (2012). *Caldas de injeção para revestimentos com perda de aderência*. Universidade de Aveiro.
- Adami, C.-E., & Vintzileou, E. (2007). Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts. *Materials and Structures*, 41(2), 255–267. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9235-z>
- Agostinho, C. S. A. (2008). *Estudo da evolução do desempenho no tempo de argamassas de cal aérea*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Botas, S., Veiga, M. R., & Velosa, A. (2012). Mecanismo de aderência na interface azulejo/argamassa. *4o Congresso Portugues de Argamassas de Construção*, 12.
- Caetano, J. I. (2011). *Motivos decorativos de estampilha na pintura a fresco dos séculos XV e XVI no Norte de Portugal. Relações entre pintura mural e de cavalete*. Universidade de Lisboa. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10451/2829>
- Caiar-te. (n.d.). Caição do Convento de Santo António. Retrieved May 15, 2017, from <https://caiarte.wordpress.com/trabalhos/convento-2/>
- Carvalho, W. T. de. (2014). *Argamassas de juntas de cal área e hidráulica para edifícios antigos*. Universidade de Aveiro.
- Coelho, A. Z., Pacheco, T. F., & Said, J. (2009). *A Cal na Construção*.
- Dow Construction Chemicals. (n.d.). Ceramic. Retrieved June 21, 2017, from <http://www.dowconstructionchemicals.com/na/en/products/ceramic/cellad/1000060.html>
- Faria, M. P. S. F. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas - Contribuição para o estudo da influência dos ligantes. Dissertação de Douturamento em Engenharia Civil*. Universidade Nova de Lisboa.
- Ferreira, M. (2012). *Análise das características mecânicas de amostras de argamassas pré-doseadas*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Figueiredo, A. (2013). *Engenharia Civil*. Universidade Técnica de Lisboa.
- Fioratti, N. (2012). *Aglomerantes minerais. Universidade Paulista “Materiais de Construção Civil.”* Universidade Paulista.
- Fortes-Revilla, C., Martínez-Ramírez, S., & Blanco-Varela, M. T. (2006). Modelling of slaked lime-metakaolin mortar engineering characteristics in terms of process

- variables. *Cement and Concrete Composites*, 28(5), 458–467.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.006>
- Gomes, J. (2016). *Caracterização experimental do comportamento reológico e mecânico de grouts com hidrófugo vegetal. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal*. Universidade Nova de Lisboa.
- Icomos. (2003). *Princípios do ICOMOS para a preservação conservação e restauro das pinturas murais*.
- Indiamart. (n.d.). Grout injections. Retrieved June 21, 2017, from [www.indiamart.com](http://www.indiamart.com)
- Lhoist. (n.d.). [http://www.lhoist.com/pt\\_pt/cal-ao-longo-da-hist%C3%B3ria](http://www.lhoist.com/pt_pt/cal-ao-longo-da-hist%C3%B3ria). Retrieved July 21, 2017, from [http://www.lhoist.com/pt\\_pt/cal-ao-longo-da-hist%C3%B3ria](http://www.lhoist.com/pt_pt/cal-ao-longo-da-hist%C3%B3ria)
- Luso, E. (2012). *Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga. Ph.D. thesis, Universidade do Minho*.
- Luso, E., & Lourenço, P. B. (2016). Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation. *Construction and Building Materials*, 102, 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.096>
- Luso, E., Lourenço, P., & Ferreira, R. (2007). Injecções para consolidação de construções em terra. *Revisão do conhecimento e método de ensaio*, 165–172.
- Maciel, L., Barros, M., & Sabbatini, F. (1998). *Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos*. São Paulo.
- Manzouri, T., Schuller, M., Shing, P. shum, & Amadei, B. (1996). Repair and Retrofit of Unreinforced Masonry Structures. *Earthquake Spectra*, 12, 903–922.
- Margalha, M. G., Veiga, R., & de Brito, J. (2007). Influência das areias na qualidade de argamassas de cal aérea. *2º Congresso Nacional de Argamassas De Construção, Lisboa, PORTUGAL*, 10.
- Paiva, H. (2005). *Caracterização reológica de argamassas*. Universidade de Aveiro.
- Rainer, L., & Beril Biçer-Şimşir. (2013). *Evaluation of Lime-Based Hydraulic Injection Grouts for the Conservation of Architectural Surfaces*. Los Angeles.
- Risalex. (n.d.). Areia de Sílica. Retrieved June 21, 2017, from <http://www.risalex.eu/pt/164-sable>
- Schueremans, L., Van Rickstal, F., Venderickx, K., & Van Gemert, D. (2003). Evaluation of masonry consolidation by geo-electrical relative difference resistivity mapping. *Materials and Structures*, 36(1), 46–50. <https://doi.org/10.1617/13710>

- Sodimate. (n.d.). Hydrated lime. Retrieved June 21, 2017, from <https://sodimate-inc.com/hydrated-lime/>
- Tavares, M. (2009). *A CONSERVAÇÃO E O RESTAURO DE REVESTIMENTOS EXTERIORES DE EDIFÍCIOS ANTIGOS “Uma Metodologia de Estudo e Reparação.”* Preservation. Universidade Técnica de Lisboa.
- Velosa, A. L. P. L. (2006). *Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas.* Universidade de Aveiro.
- Vintzileou, E. (2006). Grouting of three-leaf stone masonry: Types of grouts, mechanical properties of masonry before and after grouting. *Structural Analysis of Historical Constructions, 1*, 41–58.